

ROGÉRIO MARQUES RODRIGUES FILHO

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ
MÓVEL PARA AMBIENTES EXTERNOS**



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica

2019

ROGÉRIO MARQUES RODRIGUES FILHO

ROGÉRIO MARQUES RODRIGUES FILHO

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ MÓVEL PARA
AMBIENTES EXTERNOS**

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de ENGENHEIRO MECATRÔNICO.

Orientador: Prof. Dr. José Jean-Paul Zanlucchi de Souza
Tavares

UBERLÂNDIA - MG

2019

ROGÉRIO MARQUES RODRIGUES FILHO

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ MÓVEL PARA
AMBIENTES EXTERNOS**

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de ENGENHEIRO MECATRÔNICO.

Orientador: Prof. Dr. José Jean-Paul Zanolucchi de Souza Tavares

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Jean-Paul Zanolucchi de Souza Tavares – UFU
Orientador

Prof. Dr. José Antônio Ferreira Borges – UFU
Examinadora

Me. Marco Vinícius Muniz Ferreira – UFU
Examinadora

UBERLÂNDIA - MG

2019

AGRADECIMENTOS

A meus professores que me proporcionaram um aprendizado que vai além da engenharia, fazendo parte dos ensinamentos que levarei por toda a vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Jean-Paul Zanlucchi de Souza Tavares pela paciência e disposição em efetivar esse trabalho, mesmo com as intempéries que surgiram em seu decorrer.

A meus colegas de classe que me ajudaram e me mantiveram animado durante o curso, muitos deles se tornando grandes amigos, outra dádiva que levarei da universidade.

A meus familiares, em especial pelos meus pais e irmão, pelo incentivo para embarcar na graduação e ao longo desta, e pela compreensão nos momentos difíceis e nas ausências que a responsabilidade do curso trouxe.

A equipe de extensão EDROM à qual tive a oportunidade de participar e que mudou totalmente minha visão da engenharia e me ensinou muitas coisas ao longo dos anos em que participei. A equipe EPTA, onde tive o prazer de ser um dos fundadores, trazendo ao meio da Faculdade de Engenharia Mecânica o estudo de uma ciência tão fascinante como a Aeroespacial.

Por fim a todos que de uma forma ou outra me permitiram chegar à conclusão desta etapa, cuja importância vai além do âmbito profissional ou acadêmico.

FILHO, R. M. R., PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ MÓVEL PARA AMBIENTES EXTERNOS. 2019. 147p. Monografia de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

Resumo

Esta monografia apresenta o projeto e a construção de um robô móvel terrestre, com tração de movimento do tipo diferencial, com quatro rodas e dois motores, onde as rodas de cada lado recebem o movimento do mesmo motor. O controle de direção do robô é feito através do controle da diferença de velocidade de cada par de rodas, fazendo o virar ou se manter em trajetória retilínea. Este robô foi projetado para operação em ambientes externos, com possibilidade para uso em diversas aplicações, especialmente às voltadas à agricultura. Para isso ele teve que atender à pré-requisitos de robustez e resistência, devido à possível hostilidade dos ambientes de operação. Para garantir um projeto que atendesse tais demandas, sua estrutura foi simulada em diversos cenários pré-estipulados, utilizando-se do software Ansys®. Serão abordados neste trabalho as simulações feitas e seus resultados, bem como o dimensionamento de alguns componentes. O protótipo funcional será construído e apresentado neste trabalho, bem como o custo para fabricação do mesmo.

Palavras-Chave: Robótica móvel, Tração diferencial, Robô para agricultura, Simulação estrutural, Robô para ambientes externos.

FILHO, R. M. R., DESIGN AND DEVELOPMENT OF A MOBILE ROBOT FOR EXTERNAL ENVIRONMENTS. 2019. 147p. Graduate Course Monograph, Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG, Brazil.

Abstract

This monograph presents the design and construction of a ground mobile robot, with differential drive traction, with four wheels and two motors, where the wheels on each side receive the same motor motion. The steering control of the robot is done by controlling the speed difference of each pair of wheels, turning it or keeping it in rectilinear trajectory. This robot is designed for operation outdoors, with possibility for use in various applications, especially for agriculture. For this he had to meet the requirements of robustness and resistance, due to possible hostility of the operating environments. In order to guarantee a project that met these demands, its structure was simulated in several preset scenarios, using Ansys® software. In this work, the simulations made and their results will be discussed, as well as the sizing of some components. The functional prototype will be constructed and presented in this work, as well as the cost to manufacture it.

Keywords: Mobile robotics, Differential traction, Agricultural robot, Structural simulation, Outdoor robot.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagem artística de robô terrestre enviado para missões exploratórias em Marte.	1
Figura 2. Robô aéreo de uso militar em combate.	2
Figura 3. Robô aquático submarino com braço articulado.	2
Figura 4. Projeto de robô open-source com rodas.	3
Figura 5. Robô terrestre com esteira usado na neve.	3
Figura 6. Robô com pernas para transporte de pequenas cargas.	4
Figura 7. Modelo de estrutura do tipo gaiola usada em ambientes externos.	7
Figura 8. Perfil estrutural de alumínio fechado.	8
Figura 9. Perfil estrutural de alumínio aberto.	9
Figura 10. Elementos de fixação para perfis estruturais de alumínio.	9
Figura 11. Configuração Ackerman.	11
Figura 12. Configuração triciclo.	11
Figura 13. Configuração <i>synchronous drive</i>	12
Figura 14. Configuração omnidirecional.	12
Figura 15. Configuração diferencial.	13
Figura 16. Eixos de aço diversos.	13
Figura 17. Acoplamento parafusado com flange.	14
Figura 18. Acoplamento com rasgo para chaveta e flange (esquerda) e acoplamento combinado com rasgo de chaveta e parafusos (direita).	15
Figura 19. Acoplamentos engastados liso (esquerda) e com rosca interna (direita).	15
Figura 20. Acoplamentos complacentes: acoplamento de mandíbula (no alto à esquerda), acoplamento sanfonado (no alto à direita), acoplamento de elo ou de Schmidt (abaixo à esquerda) e junta universal ou acoplamento de Hooke (abaixo à direita).	16
Figura 21. Mancal de deslizamento.	17
Figura 22. Mancal axial.	18
Figura 23. Mancal de rolamento.	18
Figura 24. Engrenagem cilíndrica reta com ressalto.	19
Figura 25. Conjunto de engrenagens internas.	20
Figura 26. Conjunto de engrenagens externas, onde se pode ver o pinhão preso ao eixo e a engrenagem abaixo.	21
Figura 27. Câmbio automático veicular com seu conjunto de planetárias.	22

Figura 28. Engrenagens helicoidais em eixos paralelos à esquerda e em eixos cruzados à direita.....	22
Figura 29. Engrenagens cônica com dentes helicoidais à esquerda e dentes retos à direita.	23
Figura 30. Rosca sem fim e coroa.	24
Figura 31. Correia plana de borracha.	25
Figura 32. Correia trapezoidal em corte.	26
Figura 33. Jogo de polias com três correias em V.....	26
Figura 34. Jogo de polias em uso num alternador veicular.	27
Figura 35. Corrente redonda e suas respectivas polias.....	27
Figura 36. Comando de válvulas de automóvel com correia dentada.	28
Figura 37. Principais tipos de polias para uso com correias.....	29
Figura 38. Polias com cabos de aço para transmissão.	30
Figura 39. Corrente de rolos em transmissão de eixo traseiro de motocicleta.	31
Figura 40. Corrente de dentes e seu jogo de rodas dentadas.	32
Figura 41. Corrente de elos em ponta de guindaste.....	32
Figura 42. Corrente de elos de máquina agrícola.	33
Figura 43. Motor típico usado em aplicações de robótica.	35
Figura 44. Diagrama de classificação de motores, segundo Araújo (2012).	36
Figura 45. Infográfico descrevendo o funcionamento de uma máquina CC. Esta mesma configuração pode ser usada tanto como gerador de energia, quanto como motor, a depender de se será fornecida energia mecânica no eixo ou energia elétrica no enrolamento do rotor. .	37
Figura 46. Imagem ilustrativa de estator de motor CC (à esquerda) e seu respectivo rotor (à direita).....	38
Figura 47. Motor CC em corte, mostrando seus componentes principais: o estator (7), neste caso feito de ímãs permanentes, o rotor (8), com o enrolamento de armadura (4), o comutador (6) e as escovas (5).	38
Figura 48. Motor CC com ímãs permanentes no rotor.	39
Figura 49. Esquema elétrico simplificado de motor com excitação separada.....	40
Figura 50. Esquema elétrico simplificado de motor com excitação <i>shunt</i>	41
Figura 51. Esquema elétrico simplificado de motor com excitação série.	42
Figura 52. Esquemas elétricos simplificados de motor com excitação composta e derivação curta (ligação paralela-curta) e motor com excitação composta e derivação longa (ligação paralela-longa).	42
Figura 53. Ilustração simplificada de um MRV em corte.	43

Figura 54. Motor de relutância variável de alta potência.	44
Figura 55. Motor de passo desmontado mostrando seus componentes.	44
Figura 56. Rotor de motor de passo com suas saliências.	45
Figura 57. Ilustração simplificada de um motor síncrono em corte.	46
Figura 58. Motor síncrono de rotor bobinado com máquina CC integrado no eixo.	46
Figura 59. Motor síncrono de ímãs permanentes de fabricação chinesa, de propósito geral. ..	47
Figura 60. Motor <i>brushless</i> em vista explodida.	49
Figura 61. Bateria de chumbo-ácido usada para alimentar o motor de arranque e a parte elétrica de automóveis convencionais.	51
Figura 62. Bateria Li-Ion multi células usada em notebooks comerciais.	51
Figura 63. Bateria LiPo para aplicações de robótica e aeromodelismo.	52
Figura 64. Bateria NiCd para aplicações em aparelhos eletrônicos em geral.	53
Figura 65. Bateria NiMh para aplicação também em aparelhos eletrônicos.	53
Figura 66. Ilustração simplificada de <i>encoder</i> óptico e seu funcionamento.	55
Figura 67. <i>Encoder</i> óptico com estrutura de proteção IP50, para ambientes com considerável grau de contaminantes particulados.	56
Figura 68. Geometria sob análise, onde se pode ver a diferença entre os nós e os elementos.	57
Figura 69. Malha de flange de fixação com enfoque para o refino de malha feito no rebaixo.	58
Figura 70. Renderização do perfil estrutural usado.	66
Figura 71. Desenho do perfil estrutural em corte, mostrando o formato da alma.	66
Figura 72. Cantoneira de alumínio para montagem de perfil estrutural.	67
Figura 73. Renderização da gaiola da estrutura do robô.	68
Figura 74. Renderização da chapa de fechamento superior.	69
Figura 75. Renderização da chapa de fechamento lateral.	69
Figura 76. Renderização da chapa de fechamento inferior.	69
Figura 77. Renderização da gaiola fechada com todas as chapas.	70
Figura 78. Renderização da chapa de fixação dos componentes.	71
Figura 79. Roda escolhida renderizada.	73
Figura 80. Renderização da vista superior do robô aberto.	73
Figura 81. Corrente de aço especificada.	75
Figura 82. Renderização da vista superior da chapa de fixação dos componentes, com os motores e transmissão montados.	75
Figura 83. Renderização do sistema de transmissão montado (sem as correntes).	76
Figura 84. Acoplamentos para as coroas (acima) e cubo das rodas (abaixo).	77

Figura 85. Bateria Moura MA18-D.....	78
Figura 86. Renderização da montagem das baterias.....	79
Figura 87. Renderização da montagem do encoder no eixo.....	79
Figura 88. Renderização do suporte do <i>encoder</i>	80
Figura 89. Renderização dos suportes da bateria.	80
Figura 90. Renderização dos protetores de corrente.....	81
Figura 91. Renderização das torres de suporte e do andar de eletrônica.....	81
Figura 92. Renderização final do projeto fechado.....	82
Figura 93. Renderização final do projeto aberto (sem as chapas de fechamento e pneus).	82
Figura 94. Renderização final de vista lateral do projeto.	83
Figura 95. Renderização da vista inferior do projeto, mostrando os protetores de corrente.	83
Figura 96. Motor brushed (com escovas) de corrente contínua para a tração do robô.....	84
Figura 97. Montagem dos perfis com cantoneiras.....	84
Figura 98. Montagem dos perfis com conector universal.	85
Figura 99. Acoplamento da coroa maior em destaque.	85
Figura 100. Cubo da roda.	86
Figura 101. Arruelas de pressão e arruelas comuns para fixação dos parafusos e porcas.....	86
Figura 102. Parafusos M6 allen usados para fixar os suportes de ABS impressos na chapa de fixação.	87
Figura 103. Chave extratora saca pino usada para montar a corrente.	87
Figura 104. Montagem dos mancais em detalhe, mostrando o rasgo de fixação com espaço para ajuste.....	88
Figura 105. Montagem da corrente passando por baixo da chapa.....	88
Figura 106. Montagem do robô sem as chapas de fechamento.	89
Figura 107. Montagem do robô sem as chapas de fechamento, vista superior.	89
Figura 108. Montagem do robô com as chapas de fechamento.....	90
Figura 109. Montagem do robô com as chapas de fechamento, vista superior.....	90
Figura 110. Primeiro modelo simplificado da estrutura.	91
Figura 111. Modelo simplificado da gaiola.....	92
Figura 112. Modelo simplificado da estrutura fechada sem rodas.....	93
Figura 113. Modelo simplificado da estrutura fechada final (com rodas).....	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AGM	<i>Absorbed Glass Mat</i>
AGMA	<i>American Gear Manufacturers Association</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
BLAC	<i>Brushless Alternating Current</i>
BLDC	<i>Brushless Direct Current</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CC	<i>Continuos Current</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
ESC	<i>Electronic Speed Control</i>
FCE	Força Contra Eletromotriz
F.D.	Fator Dinâmico
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
IP50	Índice de Proteção 5 para particulados e 0 para água
IPM	<i>Interior Permanent Magnet</i>
LiFe	Bateria de Lítio-Fosfato de Ferro
Li-Ion	Bateria de Íons de Lítio
LiPo	Bateria de Lítio-Polímero
MAPL	Laboratório de Planejamento Automático de Manufatura
MRV	Motor de Relutância Variável
NiCd	Bateria de Níquel-Cádmio
NiMh	Bateria de Níquel-Hidreto Metálico
PMSM	<i>Permanent Mount Surface Magnet</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VRLA	<i>Valve Regulated Lead Acid</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1.OBJETIVOS.....	5
1.1.1. OBJETIVOS GERAIS	5
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.2. JUSTIFICATIVA	5
2. FUNDAMENTAÇÃO	6
2.1. PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM ROBÔ MÓVEL COM RODAS	6
2.1.1. ESTRUTURA.....	6
2.1.1.1. ESTRUTURAS DO TIPO GAIOLA.....	6
2.1.1.2. PERFIS ESTRUTURAIS DE ALUMÍNIO.....	7
2.1.2. SISTEMA DE LOCOMOÇÃO	10
2.1.2.1. LOCOMOÇÃO COM RODAS	10
2.1.2.2. EIXOS.....	13
2.1.2.3. ACOPLAMENTOS	14
2.1.2.4. MANCAIS	17
2.1.3. SISTEMA DE TRANSMISSÃO	19
2.1.3.1. ENGRENAGENS	19
2.1.3.2. CORREIAS.....	24
2.1.3.3. CABOS	29
2.1.3.4. CORRENTES	30
2.1.4. SISTEMA ELÉTRICO E MOTORES	34
2.1.4.1. MOTORES	34
2.1.4.2. BATERIAS	49
2.1.4.3. SENSORES	54
2.2. SIMULAÇÃO E ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS	56
2.2.1. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	56
2.2.2. ANÁLISE ESTÁTICA.....	60
2.2.3. ANÁLISE DINÂMICA (ANÁLISE MODAL)	62
3. DESENVOLVIMENTO	64
3.1. REQUISITOS E PREMISSAS DO PROJETO	64
3.2. CONCEPÇÃO DO PROJETO	65
3.3. PROTOTIPAGEM.....	83

3.4.	ANÁLISES POR ELEMENTOS FINITOS	90
3.4.1.	MODELO DE GEOMETRIA USADO	91
3.4.2.	ANÁLISES ESTÁTICAS	94
3.4.3.	ANÁLISES MODAIS	96
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
5.	PROJETOS FUTUROS	100
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
7.	APÊNDICE	104

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a Robótica Móvel tem sido tema de interesse de diversas instituições de pesquisa e ensino, do setor industrial e até mesmo do setor militar, graças a capacidade de aplicação em diversas soluções.

Um robô móvel é um mecanismo autônomo capaz de se movimentar e interagir com o ambiente utilizando seus sensores e atuadores. Eles diferem dos tradicionais robôs industriais justamente por sua capacidade de navegar livremente em seu espaço de trabalho.

Os robôs móveis podem ser usados em múltiplas tarefas que sejam exaustivas, perigosas ou até mesmo menos viáveis caso fossem feitas por seres humanos. Nestas tarefas se incluem: inspeções e coleta de dados em ambientes hostis, como o fundo do mar, transportes de cargas exaustivo, como no caso dos robôs de transporte militares, mapeamento de grandes áreas, como no caso dos VANTs de mapeamento, etc.

Eles podem ser classificados de acordo com o meio em que atuam sendo:

- Robôs terrestres (Figura 1), que se deslocam sobre o solo, podendo ter diversas configurações diferentes;

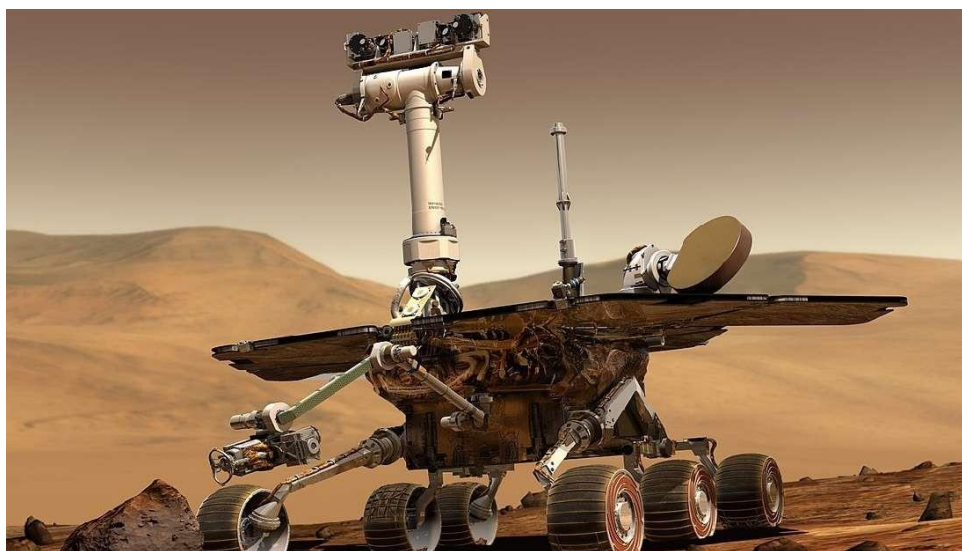


Figura 1. Imagem artística de robô terrestre enviado para missões exploratórias em Marte (<<https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2018/02/robo-que-descobriu-agua-em-marte-comemora-5-mil-dias-marcianos.html>>, 2019).

- Robôs aéreos, mais conhecidos pelo termo VANTs (veículos aéreos não tripulados), como mostrado na Figura 2, abaixo;



Figura 2. Robô aéreo de uso militar em combate (<<http://www.defesanet.com.br/vant/noticia/23991/Brasil-fica-fora-de-declaracao-americana-sobre-drones-armados/>>,2019).

- Robôs aquáticos, podendo trabalhar tanto submersos (Figura 3) quanto se deslocando na superfície como um barco.



Figura 3. Robô aquático submarino com braço articulado (<https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-966870879-drone-rov-110-rob-subaquatico-arquiologia-mo-articulada-_JM?quantity=1>, 2019).

Quanto aos robôs terrestres, estes podem ser classificados pelo seu sistema de propulsão, sendo que os principais são:

- Rodas, que são a configuração mais comum, devido à maior simplicidade desta, inclusive do controle de direção e velocidade. Podem ter várias rodas, sendo que o mais usual são 3, 4 ou 6 (Figura 4). Conseguem se deslocar muito bem em terrenos acidentados, a depender do tamanho da roda e de sua configuração, e geralmente são mais velozes.



Figura 4. Projeto de robô open-source com rodas (<<http://blog.everpi.net/2014/03/raspberry-pi-projetos-robot-doodleborg-o-mais-poderoso.html>>, 2019).

- Esteiras, que possuem a vantagem de distribuir melhor o peso e dar mais aderência ao solo, numa configuração mais compacta, porém sua montagem é mais complexa que usando rodas. São muito usados em terrenos escorregadios, como na neve (Figura 5), e para certos tipos de obstáculos.



Figura 5. Robô terrestre com esteira usado na neve (<<http://triangulomecatronico.blogspot.com/2012/09/como-escolher-plataforma-robotica-ideal.html>>, 2019).

- Pernas, que são a montagem mais robusta para terrenos acidentados ou muito irregulares, provendo uma movimentação natural com a capacidade de vencer grandes obstáculos. Das configurações citadas é a de maior complexidade mecânica e de controle. Um exemplo pode ser visto na Figura 6.



Figura 6. Robô com pernas para transporte de pequenas cargas (<https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Robo-AiDIN-III-cujos-atuadores-sao-pernas-articuladas-KOO-et-al-2013_fig1_320486839>, 2019).

Tendo em vista o acima citado, neste trabalho optou-se pelo uso de rodas, devido à sua simplicidade e eficácia.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVOS GERAIS

Projetar e desenvolver um robô móvel para ambientes externos.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Especificar os requisitos do robô móvel;
- Especificar os componentes;
- Desenhar o robô em *software* CAD;
- Simular os esforços estáticos e dinâmicos com elementos finitos;
- Montar o protótipo funcional;
- Analisar os resultados.

1.2. JUSTIFICATIVA

Este trabalho trata do projeto e prototipagem de um robô móvel para ambientes externos. Ele permitiu ampliar a experiência em um projeto de engenharia, além de melhor fixar os conceitos do curso.

Além disso, uma vez concluído, ele deve servir como base para aprimorações e novos trabalhos, que o usarão como plataforma base para desenvolver, por exemplo, trabalhos na área de navegação autônoma, visão computacional em ambientes externos (aplicações para a agricultura), estratégias de roteamento para sistemas reais, entre outros.

Assim sendo este trabalho justifica sua existência e permanecerá a disposição de outrem para melhorias e projetos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1. PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM ROBÔ MÓVEL COM RODAS

Os componentes principais de um robô variam bastante, a depender do ambiente de trabalho (terrestre, aéreo ou aquático) e do tipo de propulsão (rodas, esteiras, pernas, hélices, jato, etc.). Portanto será seguida uma divisão mais adequada ao modelo proposto, que compreenderá:

- Estrutura;
- Sistemas de Locomoção
- Sistema de Transmissão;
- Sistema Elétrico e Motores.

2.1.1. ESTRUTURA

A estrutura é o um dos mais importantes componentes de um robô móvel, especialmente para aqueles cujo o espaço de trabalho compreende um ambiente não controlado, como é o caso dos ambientes externos. Seus objetivos principais são de proteger e servir de base para a fixação dos demais componentes.

Segundo Souza (1990 apud PINTO FILHO et al., 2004), um bom projeto de estrutura de um veículo deve cumprir os seguintes atributos:

- Apresentar vida útil igual ou superior que o veículo em si, ou seja, não poderá se danificar quando em seu uso como projetado;
- Deve possuir elevada rigidez de forma a manter a manobrabilidade e a conservar suas dimensões e formato mediante as intempéries do meio e as forças a que for submetido, mantendo a fixação do sistema propulsor;
- Deve servir de suporte para os componentes de modo a protegê-los e engastá-los em suas posições.

2.1.1.1. ESTRUTURAS DO TIPO GAIOLA

As características de um ambiente externo exigem que a estrutura seja robusta e que suporte esforços dinâmicos e estáticos de várias naturezas, sem que isso danifique o funcionamento do equipamento. Nestas condições é comum o uso de estruturas no formato de gaiola, com o objetivo de proteger os componentes em seu interior de tombamentos e colisões. Um exemplo clássico de estrutura gaiola é mostrado na Figura 7, abaixo:



Figura 7. Modelo de estrutura do tipo gaiola usada em ambientes externos (<<https://www.4x4brasil.com.br/forum/gaiola-baja-e-buggy/91323-novo-projeto-gaiola-tubular-traseira-de-kombi.html>>, 2019).

A construção de uma gaiola trata basicamente da união de barras ou tubos de metal, formando uma estrutura espacial vazada. Porém, para Adams (1993 apud OLIVEIRA, 2007) “antes de projetar realmente um quadro de chassis e/ou uma estrutura do tipo gaiola, é necessário reconhecer quais formas e arranjos geométricos são rígidos e quais deles não são”. Neste sentido, o formato de um triângulo é intrinsecamente o mais rígido, pois qualquer movimento nas junções das barras exige deformação ou ruptura das mesmas. Já o formato quadrado é mais susceptível a deformações, especialmente diagonais. Adams (1993 apud OLIVEIRA, 2007) conseguiu, no entanto, bons resultados em rigidez para formatos quadrados utilizando travamento diagonal. Uma opção ao uso deste, com mesmo efeito é o uso de chapas fechando a montagem, geralmente mais finas, e que tem ainda a vantagem de selar o ambiente interno.

2.1.1.2. PERFIS ESTRUTURAIS DE ALUMÍNIO

Quanto à construção do esqueleto em si, o uso de perfis estruturais de alumínio, já amplamente utilizados para estruturas em robótica móvel, traz uma boa relação peso-

resistência. O uso de alumínio em substituição do aço vem sendo explorado pela indústria mecânica em geral, especialmente visando redução de peso e maior resistência à oxidação.

O campo de aplicação das estruturas de alumínio é praticamente o mesmo das estruturas de aço, sendo a utilização de estruturas de alumínio principalmente pesquisada em função da redução de peso (a densidade do alumínio corresponde a um terço da densidade do aço) ou de condições ambientais agressivas. O alumínio também tem grande aplicabilidade em estruturas sujeitas a ações dinâmicas, em estruturas móveis e naquelas estruturas onde o seu peso próprio corresponde a grande parte do carregamento total. (BUZINELLI; MALITE, 2000, p. 8).

Não existe muito na literatura acadêmica sobre o uso deste tipo de perfil, porém sua aplicação na indústria é algo consagrado. Isto porque são um dos elementos de construção mais práticos e versáteis para a concepção de estruturas, especialmente no que tange ao critério de prototipação, devido ao baixo custo e a grande facilidade de montagem.

Seu uso dispensa soldagem e permite ajustes e alterações no posicionamento, possuindo diversos formatos e configurações, para atender à diferentes demandas. De forma grosseira podem ser divididos em perfis fechados e abertos, sendo que os fechados são mais usados para dar melhor acabamento, como este da Figura 8.

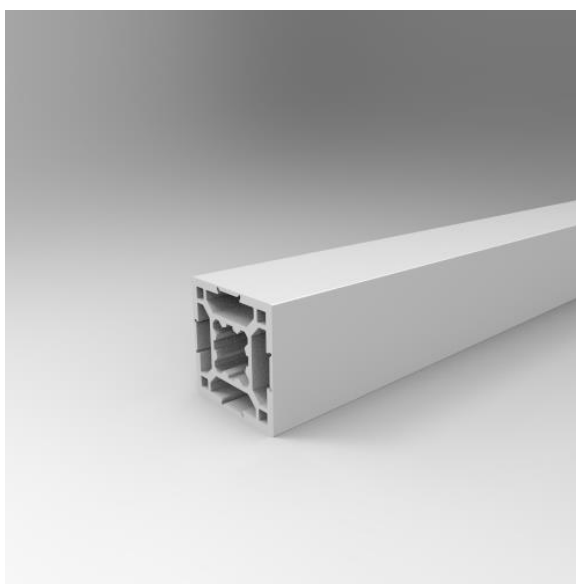


Figura 8. Perfil estrutural de alumínio fechado (<<https://loja.forsetisolucoes.com.br/perfis/PF30-04>>, 2019).

Já os perfis abertos são mais fáceis de serem montados, pois nestes existe uma canaleta onde podem ser encaixados elementos de fixação como porcas ou buchas. Um exemplo de perfil aberto básico pode ser visto na Figura 9.

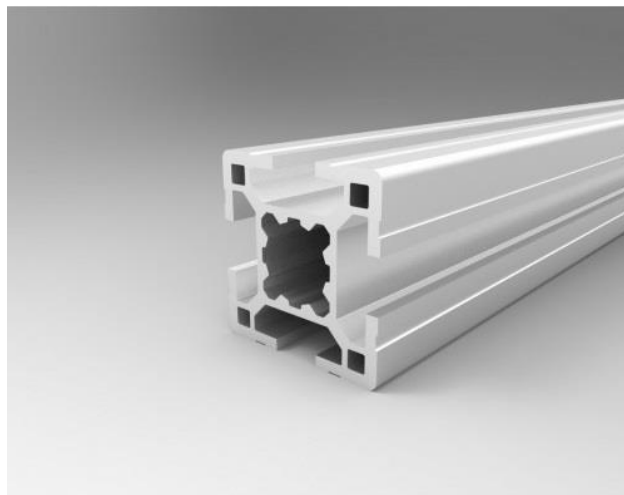


Figura 9. Perfil estrutural de alumínio aberto (<<https://loja.forsetisolucoes.com.br/perfis/PF30-01>>, 2019).

Por fim, os elementos de junção constituem ponto crítico neste tipo de montagem, uma vez que eles são os responsáveis por garantir a união da estrutura. Para o uso com perfis de alumínio existem diversos elementos disponíveis no mercado, como podemos ver na Figura 10.



Figura 10. Elementos de fixação para perfis estruturais de alumínio (<<http://www.higval.com.br/produtos/402/porcas-parafusos-bucha-e-conectores-elementos-fixacao-para-perfis-estruturais>>, 2019).

A escolha do elemento correto deve levar em consideração o tipo de montagem, as facilidades para acesso à estrutura, o tipo de engaste pretendido e o peso acrescentado pelos mesmos.

2.1.2. SISTEMA DE LOCOMOÇÃO

O sistema de locomoção é o responsável por transformar a energia advinda da rotação do motor em movimento, interagindo com o meio. No caso dos robôs terrestres, essa interação se dá com o solo, meio na qual se deslocam.

Em suma, ele compreende a parte que estará efetivamente em contato com o solo (seja ela esteira, roda, pernas, etc.), sua fixação na estrutura e os elementos de transmissão. Sua escolha depende do ambiente em que o robô irá navegar, podendo lidar com terrenos mais ou menos irregulares.

2.1.2.1. LOCOMOÇÃO COM RODAS

Segundo de Pieri (2002), quanto a parte em contato com o solo, robôs com rodas “são os mais simples, pois não necessitam de um *hardware* tão complexo quanto os robôs com esteiras e pernas [...]”. Vários modelos de rodas podem ser encontrados para o uso em robôs móveis, porém as mais robustas geralmente são as usadas em veículos tripulados, como *buggys* e karts. Para ambientes externos as rodas precisam ainda ter boa aderência para evitar a derrapagem e ter mais eficiência no deslocamento.

Em se tratando de robôs com rodas, de Oliveira (2008), trata das seguintes configurações possíveis para o sistema de locomoção:

- Configuração Ackerman: esta é uma configuração de quatro rodas, onde duas são responsáveis pela tração, e as outras duas pela direção, sendo as controláveis. Por este motivo é uma configuração não holonômica, ou seja, possui um número de graus de liberdade controláveis menor do que o número de graus de liberdade efetivos. É geralmente usada em veículos de grande porte ou muito largos e possuem uma maior complexidade construtiva. Usualmente recorrem à um diferencial para as rodas de tração, devido à diferença de velocidades entre duas rodas de lados opostos, já que o raio do centro de giração até a roda é diferente para ambas. A Figura 11 ilustra esta configuração.

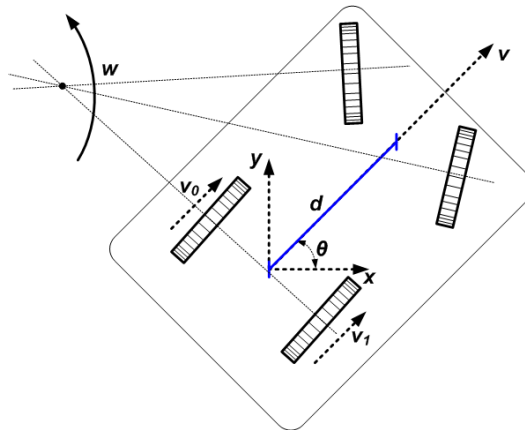


Figura 11. Configuração Ackerman (DE OLIVEIRA, 2008).

- Configuração Triciclo: esta é uma configuração de três rodas, como visto na Figura 12, que ilustra este caso. Apenas uma roda é responsável pela direção, e por isso também é não holonômica. É uma configuração menos estável que a configuração com quatro rodas, mas possui a vantagem de ser construtivamente mais simples.

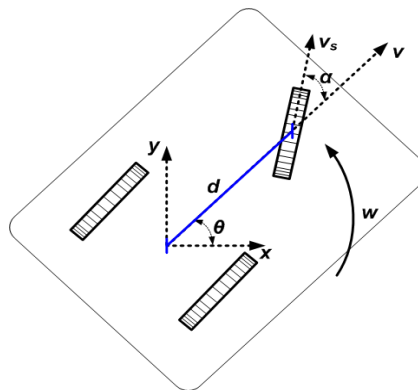


Figura 12. Configuração triciclo (DE OLIVEIRA, 2008).

- Configuração *Synchronous Drive*: nesta configuração todas as rodas são direcionáveis, de forma sincronizada. Para tal um mecanismo de transmissão (um conjunto de correias por exemplo) gira todas as rodas à mesma velocidade, deixando-as na mesma direção, e, uma vez finalizado o giro, as mesmas rodas movem-se linearmente na direção dada. Além de uma maior complexidade construtiva, esta configuração apresenta um movimento por etapas, pois um deslocamento circular e um deslocamento linear não podem ser feitos simultaneamente. Todavia ela apresenta a vantagem de poder se mover em qualquer direção, podendo varrer um plano em sua totalidade. Uma montagem típica desta configuração pode ser vista na Figura 13.

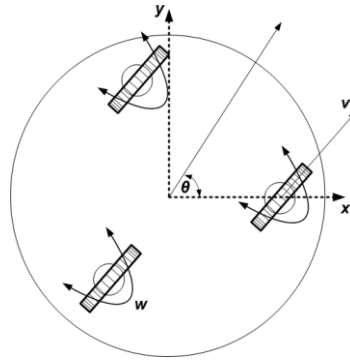


Figura 13. Configuração *synchronous drive* (DE OLIVEIRA, 2008).

- Configuração Omnidirecional: assim como a anterior, nesta configuração é possível se mover para qualquer direção, porém com a diferença de que os deslocamentos lineares e de giro são simultâneos. Com esta configuração é possível se seguir qualquer trajetória proposta, por mais curva que seja. Além disso o movimento é mais suave e ágil, já que não é necessário a rotação prévia das rodas. A holonomia desta configuração depende do número de rodas, sendo holonômica para 3 rodas (ou seja, o número de graus de liberdade controláveis é igual ao número de graus de liberdade efetivos) e redundante para 4 (ou seja, o número de graus de liberdade controláveis é maior que o número de graus de liberdade efetivos). Esta última é ilustrada na Figura 14. Apesar de suas vantagens na movimentação, esta configuração depende de rodas especiais para funcionar.

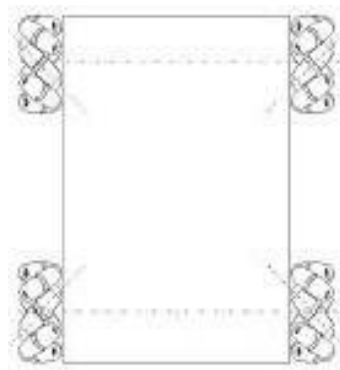


Figura 14. Configuração omnidirecional (DE OLIVEIRA, 2008).

- Configuração Diferencial: esta é a configuração mais simples para locomoção de um robô móvel. Nela todas as rodas são fixas, e o movimento de giro se dá pela diferença de velocidade entre elas. Para isso é necessário que haja ao menos um motor para cada lado do robô, podendo inclusive haver um por roda. A diferença de velocidade entre os

dois lados irá provocar o giro, enquanto as rodas do outro lado serão arrastadas para a nova posição. Com isto, a estrutura pode girar sobre si e com adequado controle dos motores, executar trajetórias bastante curvas. Porém ainda sim é não holonômica. A Figura 15 mostra uma configuração diferencial com duas rodas.

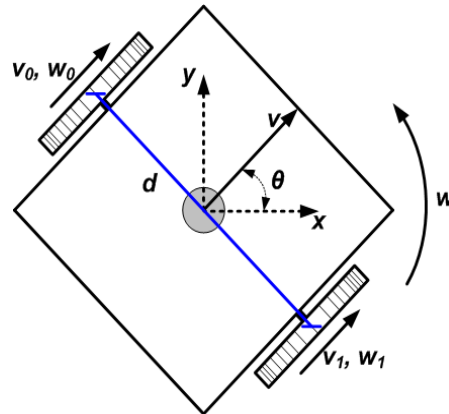


Figura 15. Configuração diferencial (DE OLIVEIRA, 2008).

2.1.2.2. EIXOS

Quanto aos elementos de fixação, são estes os eixos, acoplamentos e mancais. Eles são responsáveis por absorver boa parte da carga estática e dos esforços dinâmicos, especialmente em estruturas mais simples, onde não existe uma suspensão.

Por este motivo, o mais comum é que os eixos sejam feitos de um aço resistente, e com boa precisão dimensional, para evitar desbalanceamentos ao entrar em rotação. Na Figura 16, podemos ver algumas configurações de eixos, inclusive vazados, que podem ter uma boa relação peso resistência.



Figura 16. Eixos de aço diversos (<<https://cfmferrosemetais.com.br/eixos-de-aco-inox/>>, 2019).

2.1.2.3. ACOPLAMENTOS

Sempre que usamos um eixo em alguma máquina, existe a necessidade de acoplar uma grande variedade de outros componentes a ele, inclusive outro eixo, por exemplo. Portanto, é importante conhecer também as muitas opções de acoplamentos disponíveis e as características de cada uma.

Acoplamentos para eixos dividem-se basicamente em dois grupos, aqueles que são rígidos, não permitindo, portanto, movimentos ou deflexões relativas entre as partes unidas, e os complacentes que podem absorver desalinhamentos e cargas na junção.

Norton (2013) diz que acoplamentos rígidos são usados em montagens onde a precisão é importante. Ele elenca os seguintes tipos:

- Acoplamentos parafusados: como se indica usam parafusos (Figura 17) que se alojam em furos nos eixos, feitos para isto, podendo resistir a cargas em duas direções (radial e axial). Deve-se observar que, sem o devido cuidado com travamento, os parafusos são susceptíveis ao afrouxamento pela vibração. Uma alternativa para minimizar este efeito é o uso de parafusos arredondados cavando o eixo. Porém o furo deve ser raso para garantir interferência ao invés de provocar cisalhamento do parafuso.



Figura 17. Acoplamento parafusado com flange (<https://it.banggood.com/3mm-Flange-Coupling-Steel-Rigid-Flange-Plate-Shaft-Connector-Optical-Axis-Support-Fixed-Seat-p-1206980.html?cur_warehouse=CN>, 2019).

- Acoplamentos com chavetas: o uso de chavetas para tal é bastante usual, devido à sua confiabilidade e possibilidade de transmitir torques muito elevados. As chavetas são padronizadas para o uso, tendo uma diversidade muito grande de formatos e tamanhos.

Elas podem ser usadas junto com parafusos, posicionados à 90°, como segundo ponto de fixação do acoplamento, como na Figura 18.



Figura 18. Acoplamento com rasgo para chave e flange (esquerda) e acoplamento combinado com rasgo de chave e parafusos (direita) (<<http://www.nauticexpo.com/pt/prod/cjr-propulsion/product-26830-229141.html>> e <<http://www.mobra.dk/produkt/Starre-Kupplung-TR-aus-Stahl-Bohrung-12mm-mit-Nut>>, 2019).

- Acoplamentos engastados: neste caso a transmissão de potência se dá por interferência ou atrito. Geralmente são bipartidos para permitir a montagem ao redor do eixo, e para cargas maiores pode-se usar o travamento cônico. Também podem ter rosca interna, como o mostrado na Figura 19, ou ranhuras para aumentar a fixação, especialmente quando o eixo é feito de um material mais macio, e em casos de forças axiais.

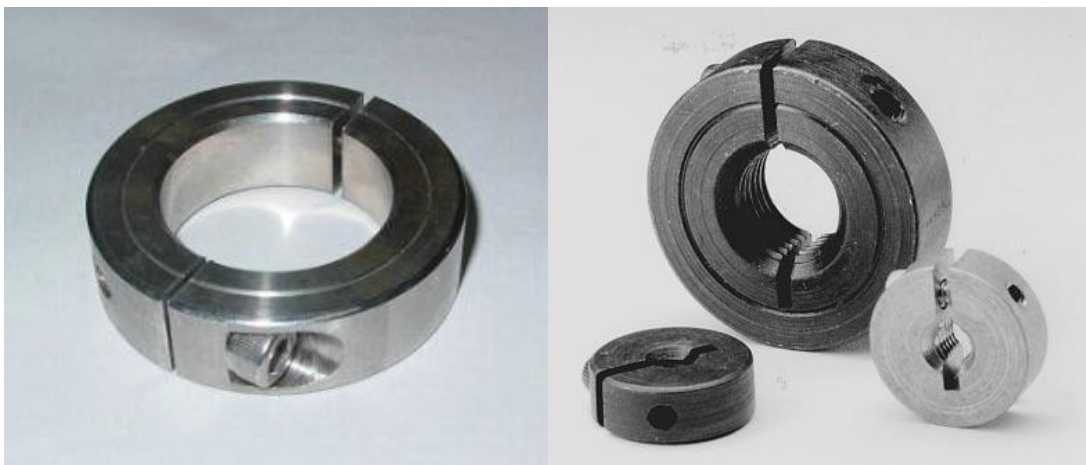


Figura 19. Acoplamentos engastados liso (esquerda) e com rosca interna (direita) (<https://pt.made-in-china.com/co_ubet-machinery/product_Threaded-Carbon-Steel-Rigid-Coupling-Shaft-Collar-with-Set-Screw_ehsysuhhg.html> e <<http://www.directindustry.com/pt/prod/boston-gear/product-9195-473425.html>>, 2019).

Os acoplamentos complacentes por sua vez podem ser de vários tipos. Eles são usados para acoplar eixos com desalinhamento e para eliminar golpes no movimento. Os de mandíbula possuem cubos com mandíbulas salientes separadas por uma peça de material flexível, geralmente borracha, e são muito usados no acoplamento de motores elétricos. Os de disco flexível são similares, e seus cubos se unem por um disco complacente. Os sanfonados são feitos com rasgos para se deformarem plasticamente permitindo a junção com desalinhamentos. Os de elo possuem vários elos que se conectam permitindo grandes desalinhamentos paralelos. Por fim existem também as chamadas juntas universais, como as do tipo Hooke. A Figura 20 ilustra alguns dos acoplamentos citados.

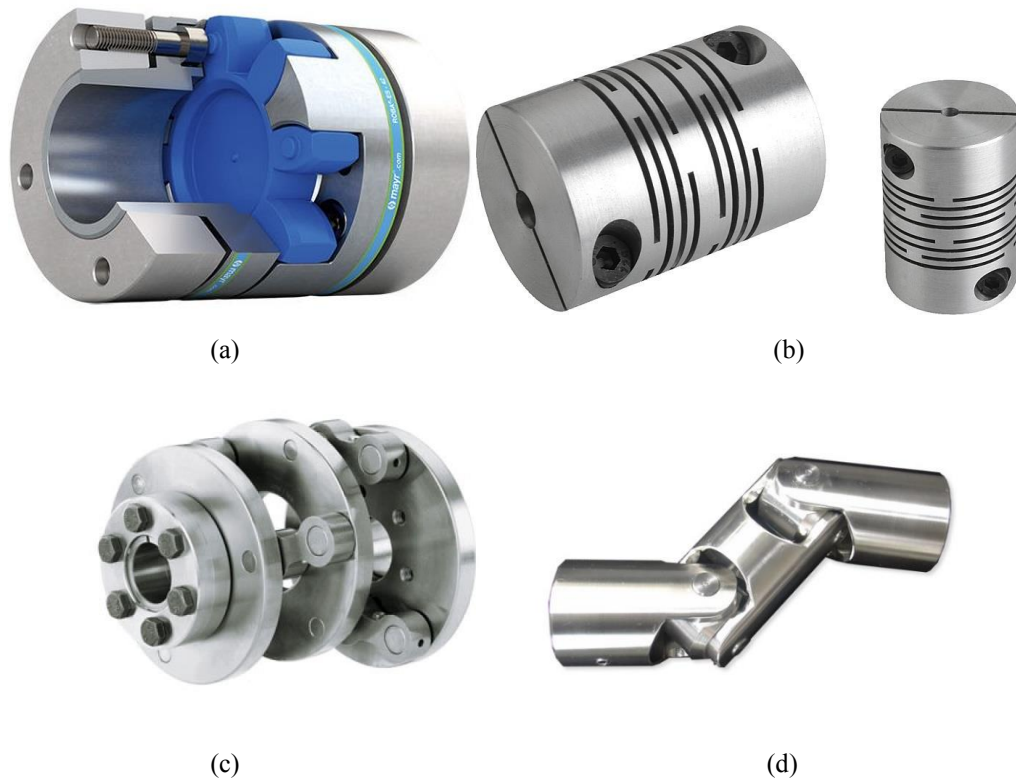


Figura 20. Acoplamentos complacentes: acoplamento de mandíbula (a), acoplamento sanfonado (b), acoplamento de elo ou de Schmidt (c) e junta universal ou acoplamento de Hooke (d) (<http://www.directindustry.com/pt/prod/mayr/product-210-189259.html>), <https://www.norelem.com/pt/pt/Produtos/Vis%C3%A3o-geral-de-produtos/Sistemas-e-componentes-para-a-constru%C3%A7%C3%A3o-de-m%C3%A1quinas-e-engenharia-mec%C3%A2nica-industrial/23000-Acoplamentos-Acoplamentos-r%C3%ADgidos-An%C3%A9is-de-fixa%C3%A7%C3%A3o-c%C3%B4nicos-Juntas-universais-Acoplamentos-de-encaixe-r%C3%A1pido-Mancais-e-rolamentos/Acoplamentos/23010-Acoplamento-de-eixo-com-cubo-de-aperto-radial-em-alum%C3%ADnio.html>, <http://www.directindustry.com/pt/prod/schmidt-kupplung/product-7332-49443.html> e <http://www.ccsmaquinas.com.br/junta-universal/junta-universal-dupla/index.asp?local=b&prod=70>, 2019).

Os cubos de roda também são um tipo de acoplamento, pois acoplam a roda ao eixo, e são feitos sob medida para a aplicação, levando em conta tanto a roda a ser usada como o eixo de encaixe.

2.1.2.4. MANCAIS

Quanto aos mancais, Michell (1929 apud NORTON, 2013, p. 624) afirmou:

Para o projetista de uma máquina, todos os mancais são claramente apenas males necessários, não contribuindo em nada para o produto ou a função da máquina; e quaisquer virtudes que possam ter são apenas de valor negativo. O mérito deles consiste em absorver a menor potência possível, desgastando-se o mais devagar possível, ocupando o menor espaço possível e custando o menos possível.

De acordo com Norton (2013), temos, em geral, os mancais planos, constituídos de duas peças de materiais que deslizem entre si, e os mancais de elementos rolantes, que como o nome diz, possuem elementos rolantes que rolam em uma pista metálica fechada.

No caso dos mancais planos, uma das partes é de material de maior dureza e resistência, como eixos de aço, e a outra irá se apoiar ou irá apoiar a primeira, sendo geralmente de outro material, como bronze ou polímero. Esta segunda parte pode ser bipartida, para ser montada na primeira, ou pode ser inteiriça, neste caso sendo chamada de bucha. Existem ainda os mancais axiais, que são projetados para suportar esforços na direção do eixo. A Figura 21 mostra um mancal de deslizamento, ou plano, e a Figura 22 mostra um mancal axial.



Figura 21. Mancal de deslizamento (<<http://www.santafecomercial.com.br/mancais-deslizamento>>, 2019).



Figura 22. Mancal axial (<<https://www.lojaigus.com.br/mancal-axial-cod-prt0230al-iglidur-versao-low-cost-peca-812603963xJM>>, 2019).

Os mancais de elementos rolantes possuem geralmente esferas de aço endurecidas ou rolos aprisionados entre pistas de aço endurecido, onde giram, e, com a lubrificação adequada, possuem um atrito muito baixo. Estes mancais podem resistir tanto a cargas radiais quanto axiais, sendo altamente versáteis nas montagens. A Figura 23, mostra um mancal de rolamento típico.



Figura 23. Mancal de rolamento (<<https://www.tekkno.com.br/produto/3986/mancal-com-rolamento-ucp-202>>, 2019).

Os mancais planos são usualmente feitos sob medida para certa aplicação, enquanto os mancais de elementos rolantes podem ser encontrados em catálogos, com versões comerciais de mercado para as diferentes cargas, velocidades e horas de vida útil necessárias.

2.1.3. SISTEMA DE TRANSMISSÃO

O sistema de transmissão é o responsável por transmitir a energia dos motores para o elemento final do sistema de locomoção, geralmente realizando alguma conversão de torque ou velocidade. Essa conversão se dará por uma relação de ganho ou redução, que é razão de sua montagem mecânica, podendo ser fixa ou variável.

A transmissão de torque de um motor para um eixo pode ocorrer através de vários mecanismos diferentes, sendo estes, engrenagens, polias com correias, catracas com correntes, etc.

2.1.3.1. ENGRENAGENS

Em se tratando de engrenagens, Norton (2013) afirma que “engrenagens são usadas para transmitir torque e velocidade angular em uma ampla variedade de aplicações. Há também uma grande variedade de tipos de engrenagem para escolher”. Apesar desta variedade, as engrenagens são classificadas por seu formato como cilíndricas ou cônicas e pelo formato de seus dentes como retas ou helicoidais. Além disso, existe ainda um tipo especial de engrenagem, a de rosca sem fim.

As engrenagens cilíndricas retas, como a mostrada na Figura 24, são o tipo mais simples de todos, projetadas para trabalhar com eixos paralelos. Suas dimensões, desenho dos dentes, produção e montagem são padronizados, sendo a AGMA (Associação Americana de Fabricantes de Engrenagens) uma das principais referências de padronização neste sentido.



Figura 24. Engrenagem cilíndrica reta com resalto (<<http://www.directindustry.com/pt/prod/maedler-gmbh/product-66929-1572034.html>>, 2019).

Elas sempre são usadas no mínimo em pares, sendo que usualmente chamamos a menor de pinhão e a maior de engrenagem. Uma das definições mais importantes de uma engrenagem é o chamado raio primitivo ou raio de referência (r_p), que é o raio da circunferência primitiva. Segundo Shigley (1984), a “circunferência primitiva é uma circunferência teórica sobre a qual baseiam-se todos os cálculos. As circunferências primitivas de um par de engrenagens acopladas são tangentes”. Em outras palavras, o raio primitivo é a distância entre o centro da engrenagem e seu ponto de contato com o pinhão.

A partir daí temos outro importante conceito, a razão da velocidade angular, ou m_v . Norton (2013) define a razão da velocidade angular (m_v) como “razão do raio de referência (primitivo) da engrenagem de entrada para aquela da engrenagem de saída”. Além disso, a constante m_v também é igual à razão entre as velocidades angulares (ω) da engrenagem e do pinhão. Em resumo temos como mostrado na Equação 1:

$$m_v = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \pm \frac{r_{p1}}{r_{p2}} \quad (1)$$

O sinal positivo ou negativo será atribuído a depender se a montagem é externa ou interna. Caso seja externa, o sentido da rotação no eixo de saída é contrário ao do eixo de entrada e, portanto, o sinal será negativo. Se for interna, o sentido de rotação será o mesmo nos dois eixos e, portanto, o sinal será positivo. A Figura 25 mostra uma montagem com engrenamento interno e a Figura 26 mostra uma montagem com engrenamento externo.



Figura 25. Conjunto de engrenagens internas (<<http://www.pozelli.ind.br/engrenagem-planetaria>>, 2019).



Figura 26. Conjunto de engrenagens externas, onde se pode ver o pinhão preso ao eixo e a engrenagem abaixo (<<http://www.orteip.com.br/engrenagem-cilindrica-dentes-retos>>, 2019).

Por fim, temos ainda o conceito de razão de torque ou ganho mecânico (m_t), que é a razão do torque do eixo de entrada pelo torque do eixo de saída. Além disso, “[...] o ganho mecânico m_t é o recíproco da razão de velocidades m_v [...]” (NORTON, 2013, p. 684). Em suma temos a Equação 2:

$$m_t = \frac{1}{m_v} \quad (2)$$

Este último é geralmente o principal requisito ao se projetar ou especificar um conjunto de engrenagens. De acordo com Norton (2013) um par de engrenagens “[...] usualmente está limitado a uma razão de cerca de 10:1 [...]” quanto ao ganho mecânico. Para poder alcançar um ganho maior, ou mesmo realizar uma montagem mais compacta, é comum se fazer associações de engrenagens, chamadas trens de engrenagens, que em suma são coleções de duas ou mais engrenagens.

Shigley (1984) fala sobre bons resultados com um trem de engrenagens ao se fazer um dos eixos girar em relação aos outros. Este arranjo também é conhecido como trem planetário ou epicicloidal e consiste de uma engrenagem central, dita solar, e uma ou mais engrenagens girando em torno dela, ditas planetárias. Esse sistema pode receber duas entradas de torque, e, portanto, tem dois graus de liberdade. São usados por exemplo, em sistemas de câmbio automático de automóveis, como o da Figura 27, na sequência.



Figura 27. Câmbio automático veicular com seu conjunto de planetárias (<<https://autovideos.com.br/como-funciona-cambio-automatico/>>, 2019).

As engrenagens helicoidais por sua vez são similares às retas, com a diferença é claro de que seus dentes tem uma inclinação em relação ao eixo de rotação de um certo ângulo de hélice. Esse ângulo varia entre 10° e 45° , e podem ser orientados para a direita ou para a esquerda (NORTON, 2013). Essas engrenagens são mais complexas de serem fabricadas, mas possuem algumas vantagens sobre as retas.

Quando usadas em eixos paralelos, são silenciosas e podem transmitir torques elevados, porém isso acarreta no surgimento de elevados esforços axiais. Também podem ser usadas em eixos cruzados, alterando a direção da normal de rotação em eixos com angulação. No uso em eixos cruzados há deslizamento entre os dentes e por essa razão, a transmissão costuma ser apenas para baixas potências. A Figura 28 mostra uma montagem em paralelo e uma cruzada de engrenagens helicoidais.



Figura 28. Engrenagens helicoidais em eixos paralelos à esquerda e em eixos cruzados à direita (<<http://www.ravi.ind.br/engrenagem-helicoidal>> e <<http://pt.rmbttmotor.com/news/5-common-gear-types-6249852.html>>, 2019).

As engrenagens cônicas são usadas quando se precisa transmitir rotações entre eixos concorrentes, usualmente com 90° de diferença, porém podem ser projetadas para qualquer angulação (SHIGLEY, 1984). Como o nome indica são feitas a partir de uma peça cônica, e seus dentes podem ser tanto retos quanto helicoidais (Figura 29).



Figura 29. Engrenagens cônica com dentes helicoidais à esquerda e dentes retos à direita (<https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/instalacoes_e Equipamento_industrial/fresadora-hipoyde/produtos/ferramentas/usinagem-de-engrenagem-conica> e <<http://jeffoliveira.blogspot.com/2008/10/engrenagem.html>>, 2019).

Assim como no caso das engrenagens cilíndricas, nas cônicas os dentes helicoidais também são mais silenciosos e suportam cargas maiores, além de que suportarem velocidades maiores.

Por último, temos as engrenagens de rosca sem fim, que são constituídas de um par onde uma das partes é o chamado sem fim, que se assemelha à rosca de um parafuso, e a outra parte é a engrenagem ou roda sem fim ou então coroa, que se assemelha à uma engrenagem cilíndrica. Os eixos da coroa e sem fim são sempre angulados, geralmente com 90° , como se pode observar na Figura 30.



Figura 30. Rosca sem fim e coroa (<<http://www.pozelli.ind.br/engrenagem-rosca-sem-fim>>, 2019).

Os sem fim podem ter um ou mais dentes, também chamados neste caso de entradas, mas são sempre valores baixos. A principal vantagem deste tipo de engrenamento é a capacidade de permitir altas razões de velocidade em uma montagem compacta. De acordo com Norton (2013), enquanto as demais engrenagens tipicamente possuem uma razão máxima de cerca de 10:1 por par, uma montagem sem fim coroa pode ter razões de até 360:1. O número de dentes está relacionado à esta razão, e, geralmente razões maiores que 30:1 possuem um dente único, enquanto que abaixo deste valor é comum que se tenha mais de um dente.

Outra vantagem no uso do sem fim é sua capacidade de auto travamento. Isso quer dizer que, desde que projetado com os ângulos corretos, o sem fim só transmite movimento se o seu eixo for o de entrada. Caso o sistema inverta e a coroa tente transmitir torque ao sem fim este trava. É aplicado por exemplo em levantamento de cargas, onde o travamento suporta o peso da carga.

2.1.3.2. CORREIAS

A transmissão de torque e velocidade entre eixos também pode ser feito usando-se elementos flexíveis. Sobre os elementos flexíveis, Shigley (1984), diz:

Usam-se elementos flexíveis, tais como correias, cabos ou correntes para transmitirem potência através de distâncias relativamente grandes. Quando estes elementos são empregados, geralmente substituem um conjunto de engrenagens, eixos e mancais, ou dispositivos similares de transmissão de potência. Tais elementos simplificam grandemente a máquina e, portanto, possuem efeito significativo sobre a redução de custos. Além disso, por serem elásticos e geralmente longos, desempenham um papel

importante na absorção de cargas de choque e no amortecimento de vibrações. Embora tais vantagens sejam importantes, no que se refere a vida útil da máquina acionadora, é a redução de custos que geralmente se torna o fator decisivo na seleção dos meios de transmissão de potência.

Os principais elementos flexíveis usados em transmissão são as correias, os cabos e as correntes.

Segundo Generoso (2009), quando a transmissão de potência de um eixo a outro usando engrenagens é inviável, seja pelo custo, seja por razões técnicas, usa-se correias. Os principais tipos de correias são as planas, as trapezoidais e as dentadas. Existem também correias redondas e em outros formatos feitos para aplicações específicas.

Ao se usar correias em um sistema (salvo para as correias dentadas) deve se estar atento aos escorregamentos e deformações que estas podem sofrer, fazendo com que as velocidades angulares e as razões de ganho não sejam constantes.

De acordo com Shigley (1984), a principal utilização para as correias planas ou chatas é quando a distância entre eixos é muito grande. Eram muito usadas em sistemas onde várias máquinas deviam ser acionadas em grupo, sendo mais tarde substituídas por acionamento elétricos. Porém ainda tem seu espaço devido à sua maior eficiência em altas velocidades e grandes potências. Sobre isso, Sarkis (2000) enumera que as correias planas podem trabalhar com potências de até 1600 kW (cerca de 2200 CV), velocidades de 18000 rpm e distância de eixos de até 12 metros. Além disso elas ainda permitem o uso em montagens com a correia cruzada, onde o sentido de rotação nas polias se inverte, e também em eixos não paralelos. A Figura 31 mostra uma correia plana em uso. Um detalhe que deve ser observado nas correias planas é que uma distância mínima entre os eixos deve ser mantida, portanto em montagens muito próximas deve se optar por outros tipos de correia.

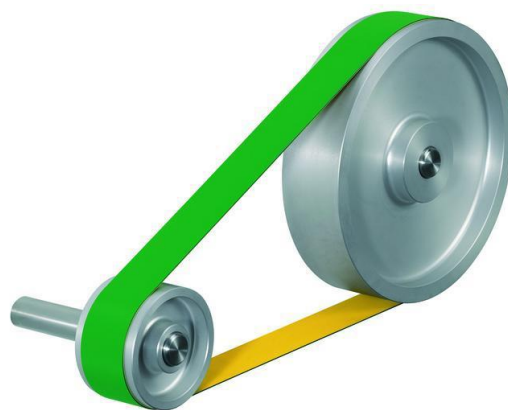


Figura 31. Correia plana de borracha (<<http://www.vedacoesmakita.com.br/produtos/correias-de-transmissao>>, 2019).

As correias trapezoidais, ou em V, tem este nome devido ao seu formato, como mostrado na Figura 32, de uma correia trapezoidal em corte.



Figura 32. Correia trapezoidal em corte (<<https://www.terranovadistribuidora.com.br/correia-trapezoidal-em-v.php>>, 2019).

Por possuírem área de contato lateral elas podem ser usadas com polias menores e também podem ser usadas em distâncias menores entre eixos. De acordo com Generoso (2009), essas correias são feitas de borracha com revestimento de lona, e, em seu interior, possuem cordonéis vulcanizados, o que aumenta sua resistência à tração. Seus perfis são padronizados e classificados por letras. Na Figura 33, podemos ver uma transmissão simples em uma polia com três correias. Na Figura 34 podemos ver um uso bastante comum, no alternador de automóveis convencionais.



Figura 33. Jogo de polias com três correias em V (<http://physicsprojectcimatec.blogspot.com/2017/08/apresentacao-inicial_24.html>, 2019).



Figura 34. Jogo de polias em uso num alternador veicular (<<https://www.minutoseguros.com.br/blog/correia-do-alternador/>>, 2019).

Além disso são inteiriças, eliminando a necessidade de junção, que ocorre nas correias chatas. A exceção a isto são as correias trapezoidais articuladas, feitas de elos unidos por grampos metálicos. Sua maior vantagem é a facilidade de montagem e desmontagem, e a possibilidade de ajuste no comprimento, removendo algum elo.

De acordo com Sarkis (2000), embora estas correias trabalhem com potências menores (1100 kW, cerca de 1500 CV), elas podem trabalhar com relações maiores (1:15) e possuem elevadas eficiências (0,95 a 0,98). Como contraponto, não podem trabalhar cruzadas, como as planas.

Existem também correias redondas, muito usadas no transporte de pequenas cargas, necessitando de polias com rasgo especial, como as da Figura 35.



Figura 35. Corrente redonda e suas respectivas polias (<<https://pt.dreamstime.com/ilustra%C3%A7%C3%A3o-stock-transmiss%C3%A3o-redonda-da-correia-image44747643>>, 2019).

Quando a aplicação exige precisão, as correias mais indicadas são as correias dentadas. De acordo com Generoso (2009), a correia dentada é “utilizada para casos em que não se pode ter nenhum deslizamento, como no comando de válvulas de um automóvel. Também conhecida como correia sincronizadora devida a sua propriedade de sincronizar movimentos entre eixos”. O uso citado é mostrado na Figura 36.

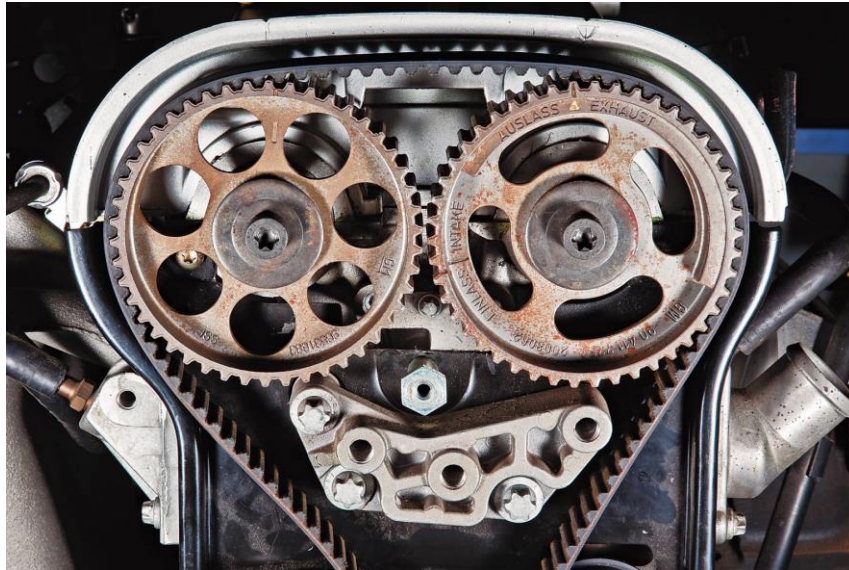


Figura 36. Comando de válvulas de automóvel com correia dentada (<<https://rodacarpneus.com.br/correia-dentada/>>, 2019).

A correia dentada possui dentes em sua face de trabalho, feitos na mesma medida que os dentes da polia que irá recebe-la (neste caso essa polia é chamada de roda dentada). Shigley (1984) diz que além de não possuir escorregamento, a correia dentada também não necessita de tensão inicial, e, portanto, a distância entre eixos pode ser fixa. Ela trabalha a praticamente qualquer velocidade, alta ou baixa, e suas desvantagens estão associadas ao custo mais alto e a necessidade de polias específicas.

O uso de correias implica no uso de polias também. A polia que transmite o movimento é chamada de polia motora ou condutora, enquanto a polia que recebe o movimento é chamada de movida ou conduzida. O sentido de giro das polias é dependente da montagem, quando a correia fica reta e aberta, o sentido de giro das polias é o mesmo. Quando a correia é posta cruzada o sentido de giro das polias fica invertido. Além disso, o diâmetro das polias é função da tensão na correia e da distância entre os eixos, para se manter um abraçamento mínimo entre correia e polia. A Figura 37 mostra os principais tipos de polias.

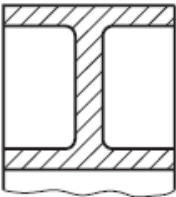
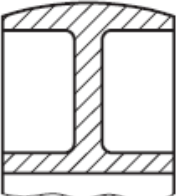
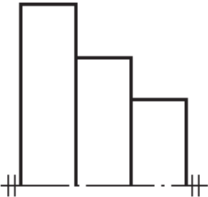
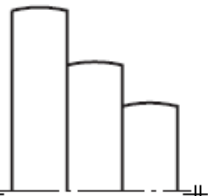
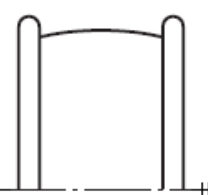
		polia de aro plano
		polia de aro abaulado
		polia escalonada de aro plano
		polia escalonada de aro abaulado
		polia com guia
		polia em "V" simples
		polia em "V" múltipla

Figura 37. Principais tipos de polias para uso com correias (GENEROSO, 2009).

2.1.3.3. CABOS

Cabos também são um elemento de transmissão flexível. Existem cabos feitos de fibras vegetais e sintéticas, usados para transmissão em longas distâncias e altas potências, sendo provavelmente uma das soluções mais econômicas (SHIGLEY, 1984). Além disso, eles dispensam um bom alinhamento, já que são muito flexíveis. Também são usados cabos de aço em polias para transmissão, como na Figura 38, em diferentes configurações de enrolamento, para dar flexibilidade ou resistência.



Figura 38. Polias com cabos de aço para transmissão (<<https://pixabay.com/es/photos/polea-cable-gr%C3%BAa-acero-263030/>>, 2019).

2.1.3.4. CORRENTES

Onde não se puder usar engrenagens ou correias, ou quando for necessário um acionamento de múltiplos eixos por um único motor, serão usadas correntes (SARKIS, 2000). Sobre o uso de correntes, Generoso (2009) elenca as seguintes vantagens:

- Não sofrem de deslizamento ou estiramento, portanto mantém a relação de ganho constante;
- Garantem um elevado rendimento mecânico, da ordem de 96% a 98%;
- Podem ser usadas para transmissão em locais difíceis de se acessar;

- Podem ser usadas quando a distância entre eixos é grande;
- Como já mencionado, permitem o acionamento de vários eixos;
- Na maioria das aplicações, dispensam o uso de tensionadores;
- Podem ser usadas em ambientes hostis, com altas temperaturas, poeira e humidade;
- Se bem lubrificadas, possuem longa vida útil;
- São muito úteis para distâncias entre eixos curtas, substituindo trens de engrenagens.

O bom funcionamento de um sistema com correntes necessita de uma boa lubrificação, o que mantém o movimento suave e prolonga a durabilidade das mesmas. As dimensões das correntes são padronizadas pela ANSI, quanto a seus elos. Os principais tipos de correntes são:

- Correntes de rolos: são compostos por talas, pinos, buchas e rolos. As talas são chapas metálicas que são ligadas entre pelas buchas e os pinos, formando os elos da corrente. Os elos alternam-se entre elos internos e externos. Sobre as buchas vem os rolos, que entram em contato com os dentes das rodas dentadas. Possuem uma ampla gama de usos, que vão desde a movimentação de contrapesos até a transmissão de potência da engrenagem motora para a roda, em motos e bicicletas, como na Figura 39.



Figura 39. Corrente de rolos em transmissão de eixo traseiro de motocicleta (<<https://chiptronic.com.br/blog/manutencao-da-corrente-de-moto-importancia-para-o-conjunto-de-transmissao-secundaria>>, 2019).

- Correntes de dentes: neste caso, sobre cada pino existem várias talas colocadas próximas, uma ao lado da outra. As talas intercalam-se entre as que estão presas ao elo anterior e as que estão presas ao elo seguinte. Essas correntes podem ser bastante largas e, portanto, muito resistentes. Elas também conservam o passo dos elos, mesmo que haja desgaste, já que são iguais, e permitem velocidades maiores que as correntes de rolo. A Figura 40 ilustra um exemplo.



Figura 40. Corrente de dentes e seu jogo de rodas dentadas (<<http://www.directindustry.com/pt/fabricante-industrial/corrente-dentes-invertidos-111943.html>>, 2019).

- Correntes de elos: essas correntes são formadas por elos que se ligam entre si diretamente. São usadas em transportadoras e máquinas agrícolas (como no caso das Figuras 41 e 42), mas também em sistemas de transmissão, somente em baixas velocidades. A remoção dos elos é mais simples já que não há peças intermediárias, como pinos ou buchas.



Figura 41. Corrente de elos em ponta de guindaste (<<http://www.saoraphael.com.br/prod-new-interno.php?proddetalhe=4>>, 2019).



Figura 42. Corrente de elos de máquina agrícola (<<http://www.correntec.com.br/elos-de-esteira-fundidos.html>>, 2019).

Por fim, assim como as correias demandam polias, as correntes demandam rodas dentadas, ou engrenagens para correntes. Generoso (2009) elenca as medidas principais de uma roda dentada como sendo: o número de dentes (n_d), seu raio primitivo (r_p), cuja definição é a mesma daquela para as engrenagens, e o passo (p), que é o comprimento da corda medida sobre o diâmetro primitivo desde o centro de um vão até o centro do vão seguinte, uma vez que as correntes se aplicam de forma poligonal nas engrenagens dentadas. Portanto, podemos escrever o raio primitivo (r_p) como na Equação 3:

$$r_p = \frac{p n_d}{2} \quad (3)$$

Generoso (2009) também afirma que a geometria dos dentes nas rodas dentadas é ditada pelas correntes que serão usadas com elas, sendo que o perfil dos dentes deve ser igual ao diâmetro dos rolos, para um bom funcionamento. Como um par de rodas dentadas é usado com a mesma corrente, podemos considerar que o passo em ambas será igual. Além disso, em termos físicos, as rodas dentadas são engrenagens, e, portanto, as relações que são válidas para as engrenagens são as mesmas para este caso. Desta forma, aplicando a Equação 3 na Equação 1 e simplificando, teremos que a razão de velocidades angulares para correntes com rodas dentadas será (Equação 4):

$$m_v = \pm \frac{n_{d1}}{n_{d2}} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (4)$$

A relação da Equação 2 também será válida para o caso das correntes e rodas dentadas. Com relação às razões de velocidade, Shigley (1984), afirma que “[...] os acionamentos de maior sucesso têm razões de velocidade de 6:1, porém podem-se usar razões mais elevadas com o sacrifício da vida útil da corrente”.

2.1.4. SISTEMA ELÉTRICO E MOTORES

Os sistemas robóticos de forma geral possuem diversos dispositivos que utilizam de energia elétrica para seu funcionamento. Portanto, todo robô necessita de um sistema elétrico de maior ou menor complexidade. O sistema de elétrico é geralmente composto de quatro tipos de componentes: fontes de energia, sensores, controladores e atuadores.

A fonte de energia é responsável por alimentar o restante do sistema, enquanto que os sensores irão coletar dados do meio, transformando-os em sinais elétricos. Por sua vez os controladores irão processar estes sinais e então, baseados em alguma programação feita, enviar um sinal de resposta aos atuadores. Os atuadores irão interagir com o meio, ou então, de certa forma, controlar os atuadores finais, como no caso dos automóveis convencionais, onde o atuador final (motor à combustão) é controlado por válvulas solenoides e pelas velas de ignição.

Muitas vezes também são necessários circuitos auxiliares para certas funções, como transformar a energia da fonte de alimentação (tensão ou corrente) para algum componente específico, filtrar ou amplificar o sinal dos sensores, prover uma interface homem-máquina para quem estiver controlando ou monitorando as ações do robô, etc.

Um bom projeto de um robô móvel, portanto, exige a correta compreensão dos dispositivos elétricos a serem usados e sua integração com os sistemas supracitados.

2.1.4.1. MOTORES

Um dos possíveis pontos de partida de um projeto de sistema elétrico de um robô são seus atuadores. Isto porque eles estão intimamente ligados à missão que o robô irá executar, sendo muitas vezes dimensionados diretamente a partir dos requisitos iniciais do projeto.

Os atuadores mais típicos de um robô, sendo indispensáveis em quase todos os projetos, são os motores. Eles irão converter a energia em rotação e torque, que serão usados para

diversos fins. Embora se possa encontrar robôs móveis cujo motor principal é à combustão, a maioria esmagadora utiliza-se de motores elétricos, graças a estes dispensarem complexos sistemas auxiliares como os motores à combustão demandam. A Figura 43 mostra um motor elétrico tipicamente usado em aplicações de robótica móvel.



Figura 43. Motor típico usado em aplicações de robótica (<https://ae01.alicdn.com/kf/HTB16kTYLFXXXXPaXXXq6xXFXXXr/timo-1500-W-48-V-Brushless-DC-Motor-El-trico-para-Dobr-vel-Scooter-El.jpg>, 2019).

Araújo (2012) define o motor elétrico como uma máquina destinada a converter energia elétrica em energia mecânica. Ele reúne o seguinte conjunto de vantagens dos motores elétricos, frente a outros tipos de motorização: utilizam de energia barata, tem peso e tamanho reduzidos, são de simples construção e controle, são muito adaptativos, podendo ser usados com diferentes tipos de cargas, e possuem um rendimento maior na conversão de energia.

Existem diferentes tipos de motores elétricos, segundo sua construção e tipo de alimentação. Araújo (2012) classifica os motores elétricos como aqueles com escovas e os sem escovas, como podemos ver no diagrama da Figura 44.

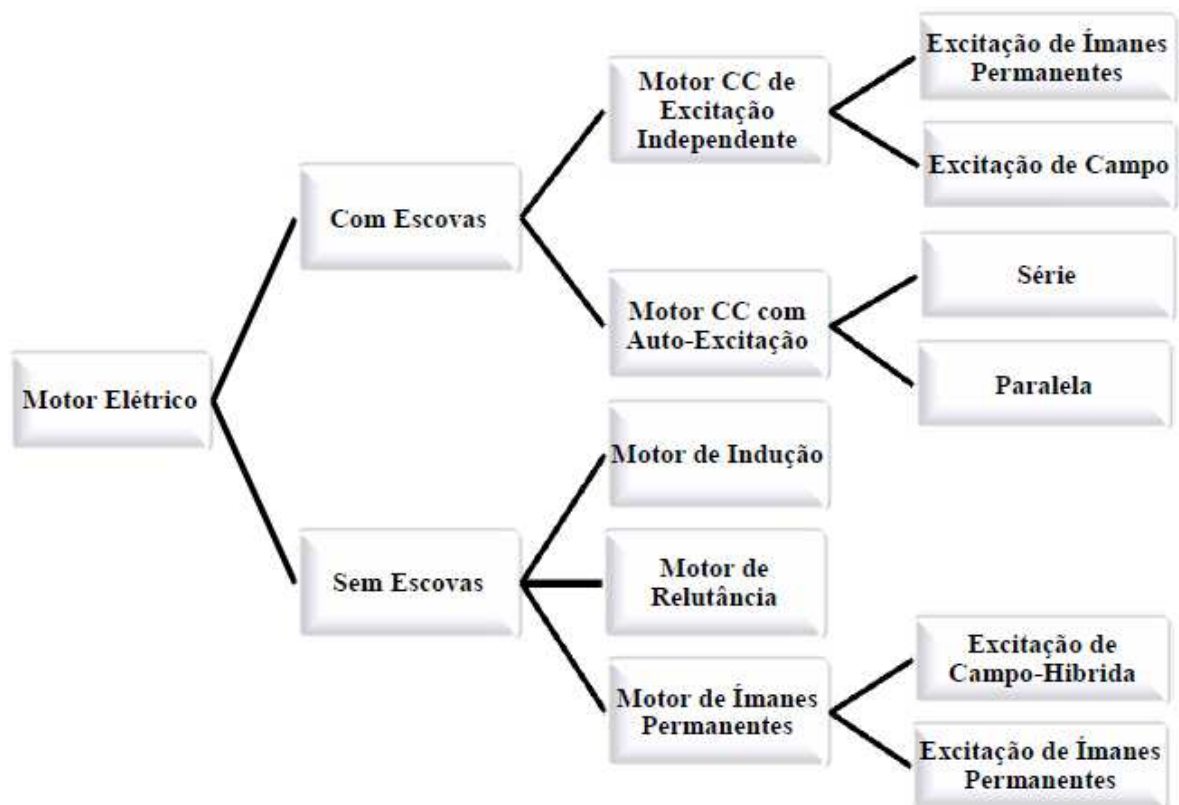


Figura 44. Diagrama de classificação de motores, segundo Araújo (2012) (ARAÚJO, 2012).

Dentre os motores citados, aqueles que podem ser alimentados com corrente contínua são mais usuais em projetos de robótica móvel, uma vez que a fonte de energia elétrica principal usada nestes é quase sempre uma bateria. Embora também seja possível o uso de motores para corrente alternada em alguns casos, geralmente a complexidade de se fazer isto inviabiliza o projeto. Dito isto, serão discutidos na sequência os tipos de motores pertinentes para a aplicação em questão, a começar pelas máquinas de corrente contínua.

Segundo Kingsley Jr., Umans e Fitzgerald (2006), as máquinas de corrente contínua, ou máquinas CC, de forma abreviada, tem como principal característica a versatilidade. Usando várias combinações de campo e excitação, estas podem apresentar características variadas de consumo e potência entregue. Seu controle é simples, face a outros tipos de motores elétricos, e podem ser usadas em uma ampla faixa de velocidades com precisão. Mesmo que recentemente em muitas aplicações venham sendo substituídas pelas máquinas de indução, sua versatilidade ainda as mantém como opção mais viável em muitos cenários, em especial quando a fonte de alimentação é uma bateria. O infográfico da Figura 45, a seguir, descreve de forma simplificada o funcionamento de uma máquina de corrente contínua.

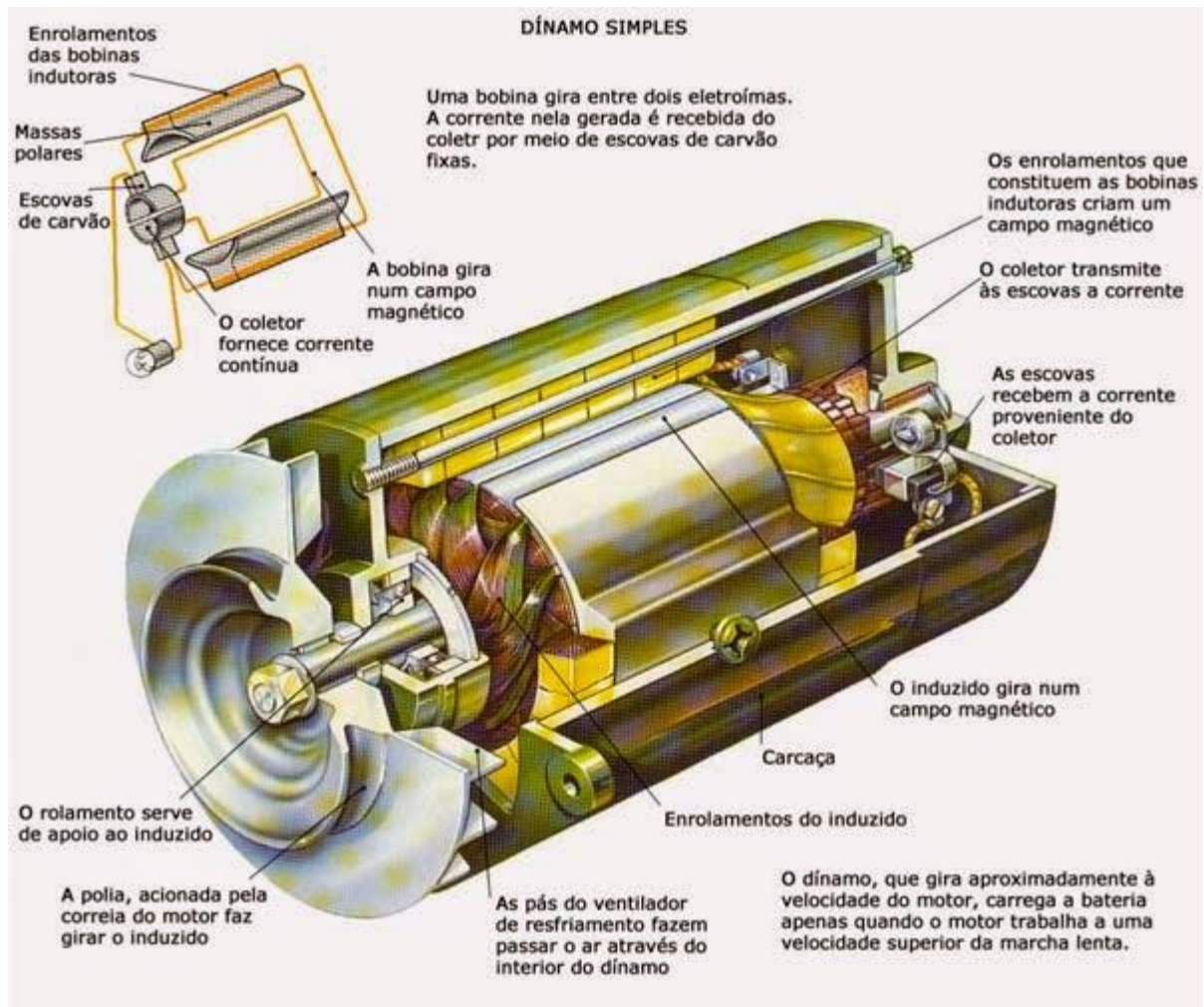


Figura 45. Infográfico descrevendo o funcionamento de uma máquina CC. Esta mesma configuração pode ser usada tanto como gerador de energia, quanto como motor, a depender de se será fornecida energia mecânica no eixo ou energia elétrica no enrolamento do rotor (<<https://www.rsaengenharia.com/2015/09/partes-e-caracteristicas-de-um-motor-de.html>>, 2019).

De acordo com Bim (2015), um motor CC é constituído basicamente de duas partes, cada uma delas abrigando um circuito elétrico com funções distintas: um estator, onde ficam os chamados pólos indutores e os pólos auxiliares, e o rotor, onde ficam os enrolamentos que realizam a conversão de energia e as lâminas do comutador. A Figura 46, a seguir, mostra estas duas partes em separado, com seus componentes que serão melhor detalhados na sequência.

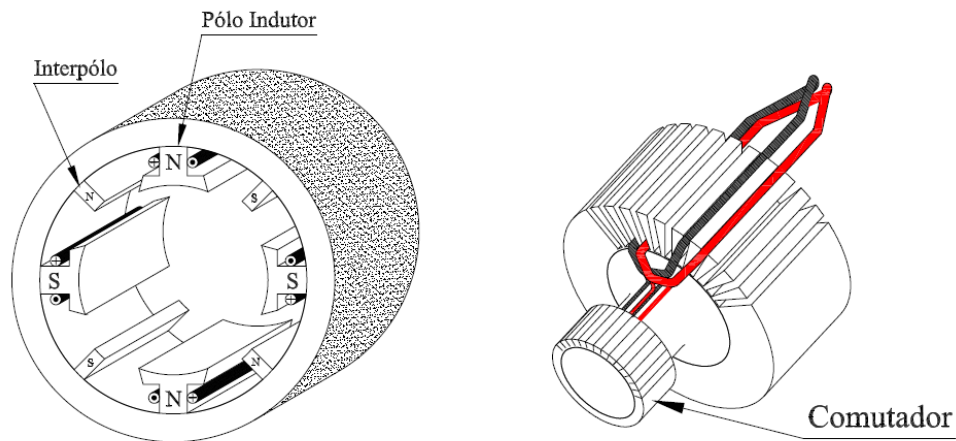


Figura 46. Imagem ilustrativa de estator de motor CC (à esquerda) e seu respectivo rotor (à direita) (BIM, 2015).

No estator, que tem este nome pois é a parte fixa do motor, estão as bobinas ou enrolamento do campo indutor, que possuem este nome pois induzem tensão nas bobinas do rotor, envolvendo os chamados pólos indutores. Existem ainda pólos menores entre os pólos indutores, que são os auxiliares, ou interpólos, como mostrado na Figura 46, e que servem para anular o fluxo magnético que possa surgir devido ao efeito da chamada corrente de armadura, que é a corrente induzida pela tensão no rotor. Na Figura 47 podemos também ver um motor CC real em corte, mostrando os componentes citados.

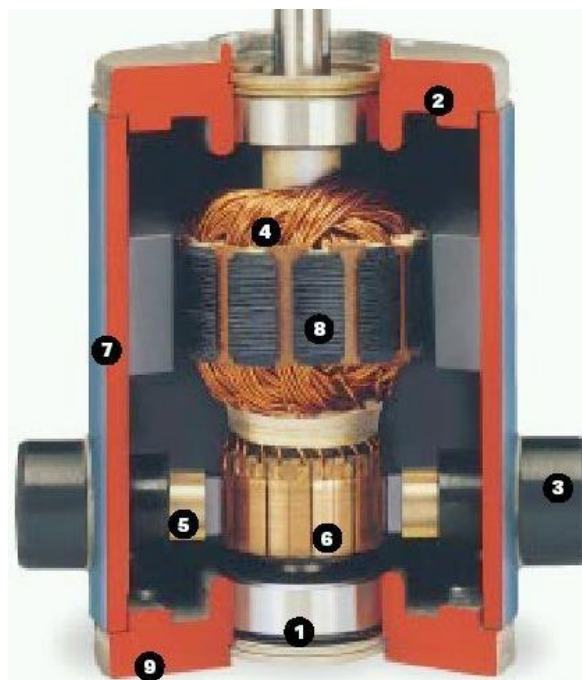


Figura 47. Motor CC em corte, mostrando seus componentes principais: o estator (7), neste caso feito de ímãs permanentes, o rotor (8), com o enrolamento de armadura (4), o comutador (6) e as escovas (5) (<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1230461/mod_resource/content/1/MCC_Resumo.pdf>, 2019).

A corrente contínua circula pelo enrolamento de campo e gera, portanto, um fluxo magnético indutor. Este enrolamento é substituído em alguns motores por ímãs permanentes, como no caso da Figura 47, que geram então este campo. Isso elimina a possibilidade de controlar o fluxo magnético indutor, mas possibilita máquina menores, mais leves e mais eficientes. Sua maior desvantagem é o custo e a sensibilidade à altas temperaturas de operação, que alteram as características magnéticas dos ímãs.

Os ímãs permanentes mais usados são os ferrites, feitos de material cerâmico. Já nos casos de motores de alto desempenho ou que precisam ser menores e mais leves ainda, usa-se ímãs de terras raras, como os de samário-cobalto e neodímio-ferro-boro. Também são usadas algumas ligas metálicas, como as de alumínio, níquel, cobalto e ferro. A Figura 48 mostra um motor CC com ímãs permanentes no rotor.

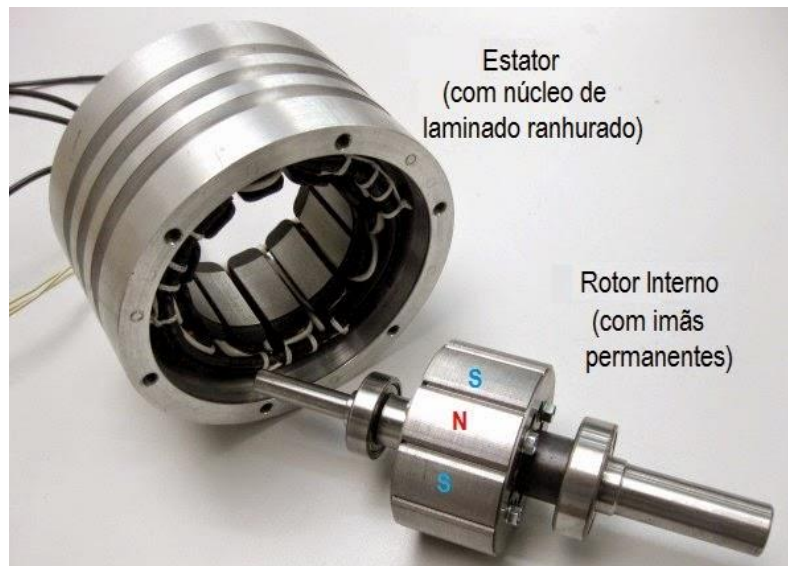


Figura 48. Motor CC com ímãs permanentes no rotor (<<http://automoveiseletricos.blogspot.com/2015/05/como-se-constituem-e-operam-os-motores.html>>, 2019).

O rotor, por sua vez, é a parte móvel do motor e possui um formato cilíndrico para evitar desbalanceamentos no giro. Nele estão os chamados enrolamentos de armadura, alojados em ranhuras, como mostrado na Figura 46. Nele também está o eixo do motor, onde será acoplada a carga, e onde está o comutador, mostrado na Figura 47. Este último é um conjunto de barras de cobre isoladas entre si, distribuídas ao longo da circunferência do eixo, onde se ligam as bobinas da armadura. Estas são ligadas em série, formando um circuito fechado com os terminais nas barras do comutador. Essas bobinas irão girar juntamente com o rotor, e, as

escovas fixas na carcaça e pressionadas sobre o comutador farão a conexão elétrica de seus terminais, ligando assim, os terminais interno e externo da armadura.

O torque do motor vem da conversão da energia elétrica em mecânica, que acontece pela interação entre os fluxos magnéticos do estator e do rotor. Para que o rotor gire sempre na mesma direção, e, portanto, o torque resultante seja também na mesma direção, cada pólo do estator deve sempre interagir com o mesmo fluxo magnético da armadura, o que implica que a corrente nas bobinas enquanto passando por aquele pólo, deve ter sempre o mesmo sentido. Se a corrente na armadura se inverte e os pólos no estator se mantém, então o torque também irá se inverter. Portanto, a inversão da rotação nas máquinas CC pode ser obtida simplesmente invertendo a tensão de alimentação.

Bim (2015) classifica as máquinas CC sem ímãs permanentes “[...] de acordo com as conexões do enrolamento do campo indutor: máquinas de campo separado, de campo paralelo, de campo série e de campo composto”. Seguindo esta classificação teremos:

- Excitação separada: quando o enrolamento do estator é ligado à uma fonte separada do circuito da armadura, como no esquemático da Figura 49, então este motor é chamado de motor de excitação independente, ou de excitação separada. Uma característica desta configuração é que a diminuição da velocidade devido ao aumento de carga é pequena, cerca de 3% geralmente, podendo ser considerado um motor com velocidade praticamente constante.

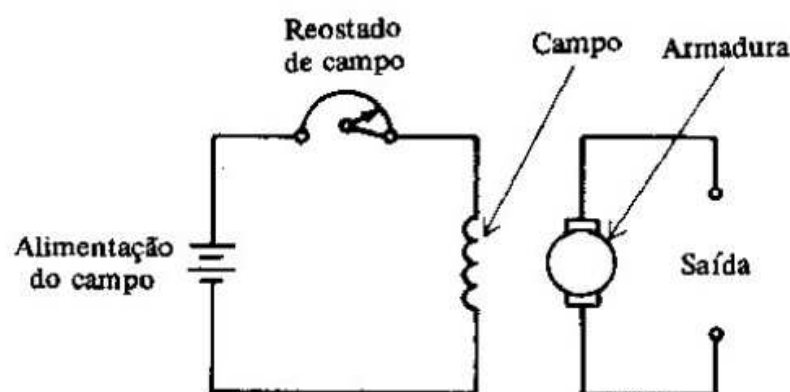


Figura 49. Esquema elétrico simplificado de motor com excitação separada (<https://pt.slideshare.net/tiagosantiago125/microsoft-power-point-motores-e-geradores-cc-20112a?from_action=save>, 2019).

- Excitação paralela: neste caso, também chamado de motor derivação ou *shunt*, os enrolamentos são conectados em paralelo, na mesma fonte, como no esquema da Figura 50. Portanto, a corrente de campo depende da tensão de armadura (já que são as mesmas). É comum nesta configuração o uso de um resistor em série com o enrolamento de campo, para se ter controle da corrente neste. A curva velocidade-torque desta configuração é similar à da anterior.

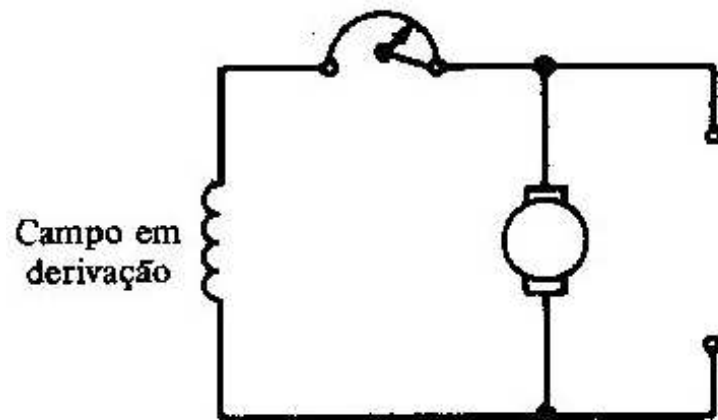


Figura 50. Esquema elétrico simplificado de motor com excitação *shunt* (<https://pt.slideshare.net/tiagosantiago125/microsoft-power-point-motores-e-geradores-cc-20112a?from_action=save >, 2019).

- Excitação série: na excitação série, o enrolamento de campo é conectado em série com o enrolamento da armadura (Figura 51), e como as correntes de armadura são elevadas, os condutores devem ter uma bitola maior e o número de espiras será conseqüentemente menor para produzir a mesma força magneto-motriz que o motor de excitação separada. A corrente de campo e a de armadura serão as mesmas, e devido a isso as variações na armadura variam o fluxo indutor. Existe um limite para o valor deste fluxo que ocorre pela saturação magnética, o que o impede de crescer indefinidamente. Como a inversão da corrente de armadura implica também na inversão da corrente de campo, ela não gera inversão do torque. Por este motivo, este motor com algumas alterações de projeto, pode ser usado com corrente alternada também. Sua curva velocidade-torque não é linear, e, portanto, a vazão a velocidade é alta e cai drasticamente quando é exigido torque. Por conta disso ele é interessante em aplicações onde se precisa de alto torque de partida por unidade de corrente. Conforme o torque atinge valores mais altos, a variação de velocidade diminui (curva velocidade-torque se aproxima de função exponencial decrescente).



Figura 51. Esquema elétrico simplificado de motor com excitação série (<https://pt.slideshare.net/tiagosantiago125/microsoft-power-point-motores-e-geradores-cc-20112a?from_action=save>, 2019).

- Excitação composta: quando se deseja um motor cujas características de desempenho são a combinação das máquinas série e paralelo, usa-se a excitação composta. Ela é obtida ao conectarmos um enrolamento de campo em separado e outro em série (Figura 52). A ligação série pode ser feita em série com a armadura (ligação paralela-longa) ou pode ser feita externamente no circuito da armadura (ligação paralela-curta). Os efeitos da excitação série são melhor notados em correntes de carga mais altas, a baixas correntes não são muito significativos.

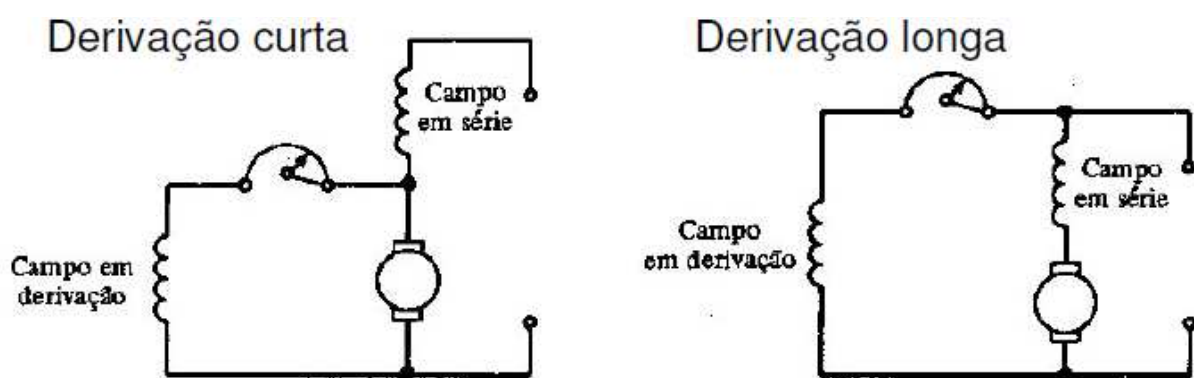


Figura 52. Esquemas elétricos simplificados de motor com excitação composta e derivação curta (ligação paralela-curta) e motor com excitação composta e derivação longa (ligação paralela-longa) (<https://pt.slideshare.net/tiagosantiago125/microsoft-power-point-motores-e-geradores-cc-20112a?from_action=save>, 2019).

Um outro tipo de motor elétrico que vêm crescendo em uso recentemente é o motor de relutância variável. Kingsley Jr., Umans e Fitzgerald (2006) afirmam que as máquinas de relutância variável, ou MRV, são as mais simples máquinas elétricas. São constituídas por um estator que possui os enrolamentos de excitação e de um rotor feito de material magnético e que possua saliências proeminentes. Por essas saliências serem feitas de material magnético, sua relutância é menor que o entreferro e, portanto, o rotor tende a se alinhar com as ondas de fluxo do estator, como mostrado na Figura 53.

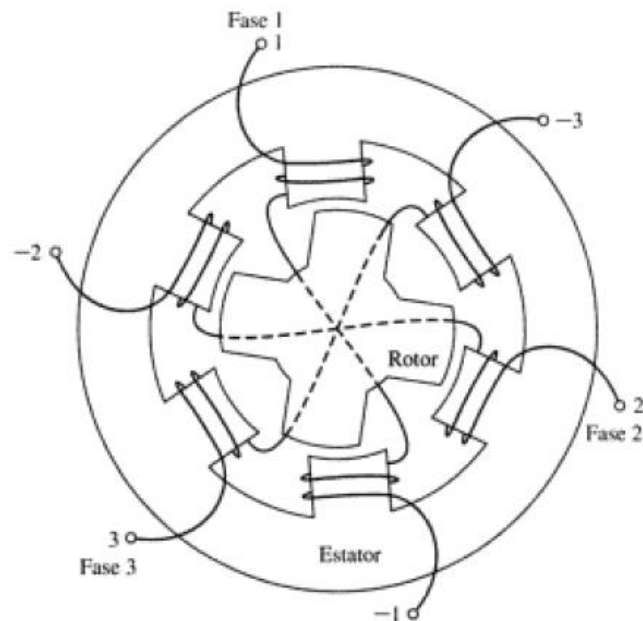


Figura 53. Ilustração simplificada de um MRV em corte (KINGSLEY JR; UMANS; FITZGERALD, 2006).

O conceito de funcionamento destes motores é antigo, porém só nos últimos anos que a eletrônica moderna possibilitou meios de controla-los, já que este controle depende de conhecer por exemplo a posição do rotor, para se energizar corretamente os enrolamentos do estator. Porém, como este motor só possui excitação no estator, ou seja, as únicas perdas resistivas são no estator, unido ao fato de que o estator é mais fácil de ser refrigerado, ele possui menos perdas e, portanto, para a mesma potência pode ser menor. Na Figura 54, podemos ver um motor de relutância variável de 15 HP ou 11 kW usado na indústria têxtil.



Figura 54. Motor de relutância variável de alta potência (<<http://www.directindustry.com/pt/prod/isgev/product-19782-58311.html> >, 2019).

Além disso, Araújo (2012) elenca como vantagens a simplicidade de fabricação e robustez, baixo custo, ótima relação torque-velocidade e uma ampla gama de velocidades de uso. Como desvantagens, além do controle mais complexo como já dito, estes motores apresentam um certo ruído, que pode chegar a ser audível, e que leva à certas oscilações no torque.

Quando as fases deste motor são energizadas sequencialmente, ele gira em passos, onde cada passo compreende um ângulo específico. Essa característica deu origem a um tipo especial de MRV, o motor de passo, onde o projeto deste é feito para maximizar o efeito citado. Na Figura 55 podemos ver um motor de passo desmontado, com seus componentes integrantes.

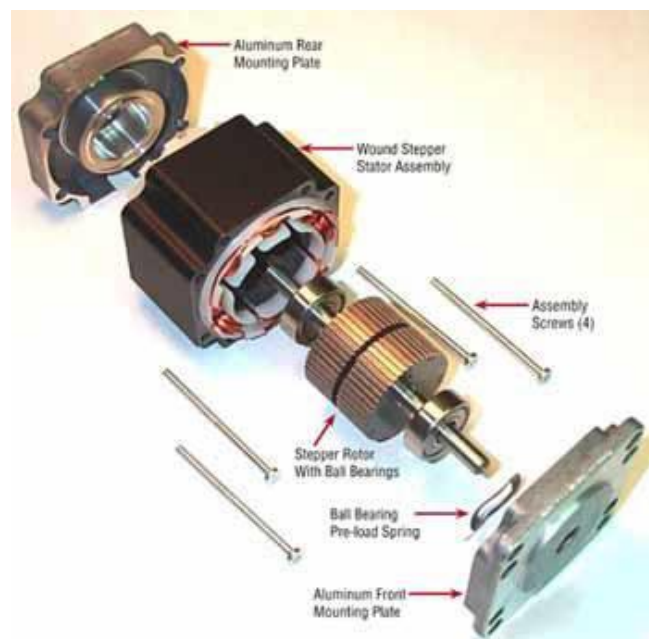


Figura 55. Motor de passo desmontado mostrando seus componentes (<<https://msmrobotics.wordpress.com/category/cnc/> >, 2019).

Para garantir um passo pequeno o suficiente para dar resolução angular ao movimento, os rotores dos motores de passo possuem vários dentes, como o da Figura 56.



Figura 56. Rotor de motor de passo com suas saliências (<<http://www.profelectro.info/tag/motor-panqueca/page/2/>>, 2019).

Motores de passo são bastante usados em aplicações de robótica devido à sua compatibilidade com sistemas digitais eletrônicos, podendo ser facilmente controlados com sinais digitais como os trens de pulso ou PWM (*Pulse Width Modulation*). Para aumentar a exatidão destes motores e também seu torque, é comum o uso de ímãs permanentes, combinados à geometria de relutância variável.

Segundo Kingsley Jr., Umans e Fitzgerald (2006), outra característica comum nos motores de passo é a chamada configuração de empilhamento múltiplo, ou seja, o rotor apresenta mais de um conjunto de saliências, chamadas empilhamentos, deslocadas axialmente e com geometrias idênticas entre si, como podemos ver na Figura 56, onde o rotor possui 2 empilhamentos. Cada empilhamento é excitado por um enrolamento do estator, e o rotor ou o estator (não ambos), estão deslocados angularmente de: $\theta \times 1/n$, onde θ é o ângulo do pólo e n o número de empilhamentos. Assim o rotor pode ser girado em incrementos iguais a este ângulo de deslocamento, dando uma maior resolução ao movimento.

Ao contrário dos demais motores aqui citados, o motor de passo é projetado não para controlar velocidade ou torque da carga, mas sim para controlar sua posição, razão pela qual é muito usado em máquinas CNC e impressoras.

As máquinas síncronas tem também seu espaço nos projetos de engenharia. Uma máquina síncrona é uma máquina onde o campo magnético do rotor e o próprio rotor giram juntamente com o campo magnético do estator. Com isso, não há nestes motores o efeito de escorregamento e por este motivo eles são mais eficientes que os motores de indução. Em geral é uma máquina alimentada com corrente alternada no estator, que neste caso contém o enrolamento de armadura, e corrente contínua no rotor, onde está o enrolamento de campo. A Figura 57 ilustra um motor síncrono simplificado.

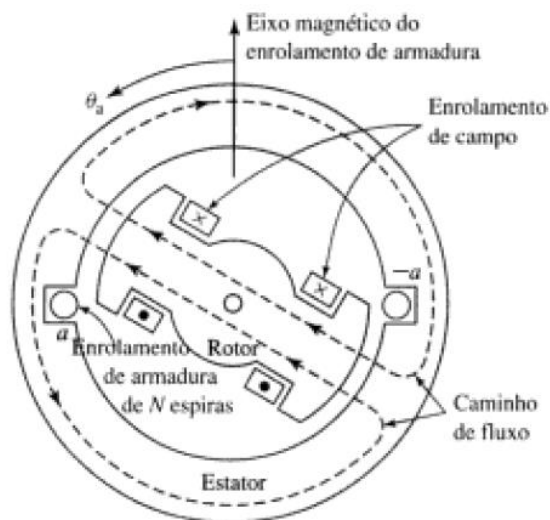


Figura 57. Ilustração simplificada de um motor síncrono em corte (KINGSLEY JR; UMANS; FITZGERALD, 2006).

As máquinas síncronas podem ser de dois tipos: as de rotor bobinado, que operam como descrito acima, e as de ímãs permanentes, onde o enrolamento no rotor é substituído por ímãs permanentes. As Figuras 58 e 59, a seguir, mostram respectivamente um motor síncrono com rotor bobinado e um motor síncrono com ímãs permanentes.

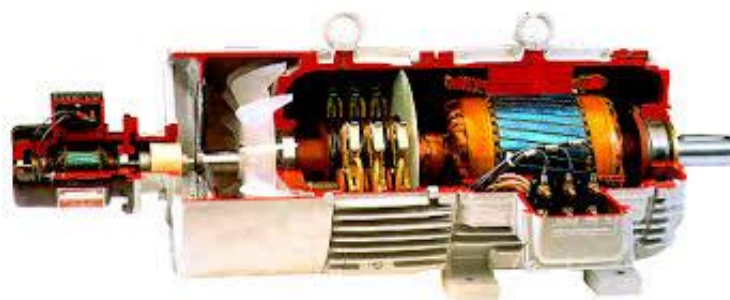


Figura 58. Motor síncrono de rotor bobinado com máquina CC integrado no eixo (<<http://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/apostila-de-motores-trifasicos-de-ca>>, 2019).



Figura 59. Motor síncrono de ímãs permanentes de fabricação chinesa, de propósito geral (<<http://pt.hanzelmotor.org/synchronous-motor/yxty-permanent-magnet-synchronous-motor/0-55kw-75kw-nema-permanent-magnet-energy.html>>, 2019).

Os motores de rotor bobinado necessitam de um sistema de excitação de corrente contínua para o rotor, que pode ser uma máquina CC, como nos motores antigos, ou então um circuito retificador como nos motores mais novos. Este incremento de sistemas, aliado a outros fatores, sendo um dos mais importantes o fato de serem alimentados com corrente alternada, faz com que não seja usual este tipo de motores em robôs móveis, onde muitas vezes o peso e o espaço são limitados, além de que a fonte de energia é quase sempre de corrente contínua. Por este motivo, os motores de rotor bobinado não serão explorados além neste trabalho. Já os motores com ímãs permanentes por sua vez, devido ao fato de dispensarem o uso de um sistema de excitação em separado e por outras vantagens que serão exploradas na sequência, são amplamente usados em projetos desta natureza, especialmente aqueles conhecidos como motores *brushless* (sem escovas), pois são alimentados com corrente contínua.

Segundo Araújo (2012), a não utilização de escovas torna os motores síncronos de ímãs permanentes mais robustos que os motores CC, e como já dito, também mais eficientes que os motores de indução, já que além de não possuírem escorregamento no rotor, também não possuem perdas associadas à corrente no rotor. Além disso eles também possuem uma ótima relação potência-volume, alto torque e o controle de velocidade é fácil (frente a outros como os motores de indução) e preciso. Suas maiores desvantagens são as mesmas já citadas anteriormente para motores com ímãs permanentes, a saber, o custo mais elevado e a sensibilidade à altas temperaturas (devido à perda de propriedades magnéticas dos materiais quando submetidos a temperaturas elevadas).

Araújo (2012) ainda classifica estes motores quanto à disposição dos ímãs no rotor e quanto ao modo como são dispostos os enrolamentos no estator. Quanto à disposição dos ímãs no rotor, eles podem ser dispostos na periferia do rotor, sendo chamados de PMSM (*Permanent Mount Surface Magnet*), ou podem ser colocados no interior do rotor, sendo chamados IPM (*Interior Permanent Magnet*). Os do tipo PMSM possuem uma maior densidade de fluxo magnético, uma vez que o entreferro é menor, mas são menos robustos, graças à exposição dos ímãs. Já os do tipo IPM possuem maior robustez e, portanto, suportam velocidades mais elevadas, mas são mais caros, graças à complexidade construtiva.

Os motores do tipo IPM possui características similares aos motores PMSM, porém possuem a vantagem de poderem trabalhar com enfraquecimento de campo, como já referido anteriormente, o que na linguagem técnica de máquinas elétricas está associado a um aumento de velocidade. Dessa forma maiores torques também são possíveis, se comparados aos PMSM.

Os motores do tipo PMSM ainda são classificados quanto à disposição do enrolamento no estator, o que está diretamente ligado às forças contra eletromotrizes, ou FCE, geradas no motor. Eles podem ser do tipo BLDC (*Brushless Direct Current*) quando o enrolamento é concentrado, dando origem a uma FCE de onda trapezoidal, ou do tipo BLAC (*Brushless Alternating Current*), quando o enrolamento é distribuído, o que gera uma FCE de onda senoidal. Estes dois tipos são motores trifásicos, portanto como o nome diz, o BLDC é usado com corrente contínua.

Os motores BLAC tem como vantagens a variação constante da posição do fluxo magnético, a possibilidade de se ligar todas as fases ao mesmo tempo, um torque sem *ripple* (oscilações) no momento das comutações e um menor conteúdo harmônico, porém tem perdas maiores na comutação e seu algoritmo de controle é mais complexo. Além disso é um motor para corrente alternada, e como já explicado, não daremos enfoque a este tipo de motores neste trabalho.

Já o motor BLDC, também conhecido apenas como motor *brushless*, tem perdas de comutação menores e um algoritmo de controle mais simples que o BLAC, porém seu fluxo do estator é comutada a cada 60° e apenas duas fases podem estar ativas simultaneamente. Além disso também apresenta um certo *ripple* no torque de saída e harmônicos de baixa frequência que podem ser audíveis.

De acordo com Kingsley Jr., Umans e Fitzgerald (2006), estes motores são chamados também de motores CC sem escovas, uma vez que é possível analisa-los como motores CC, onde o enrolamento de campo está no rotor e a armadura, no estator, é comutada eletronicamente por um sistema de controle auxiliar. De fato, esta é a principal utilização para

este tipo de motor, onde se usa um dispositivo de acionamento de frequência e tensões variáveis chamado ESC. Este dispositivo, sendo alimentado por uma corrente contínua, comuta então essa corrente entre as três fases do motor, acionando-as aos pares. Controlando essa comutação, e, eventualmente com o feedback de algum sensor de posição, pode-se controlar a velocidade do motor. Com isto este motor ganhou bastante espaço em aplicações de robótica móvel e eletrônica nos últimos anos, sendo usado por exemplo em coolers de refrigeração de computadores, como motor propulsor de VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) e aeromodelos, em equipamentos eletro-médicos, bicicletas elétricas, etc. Na Figura 60 podemos ver um infográfico de um motor *brushless*, em vista explodida.

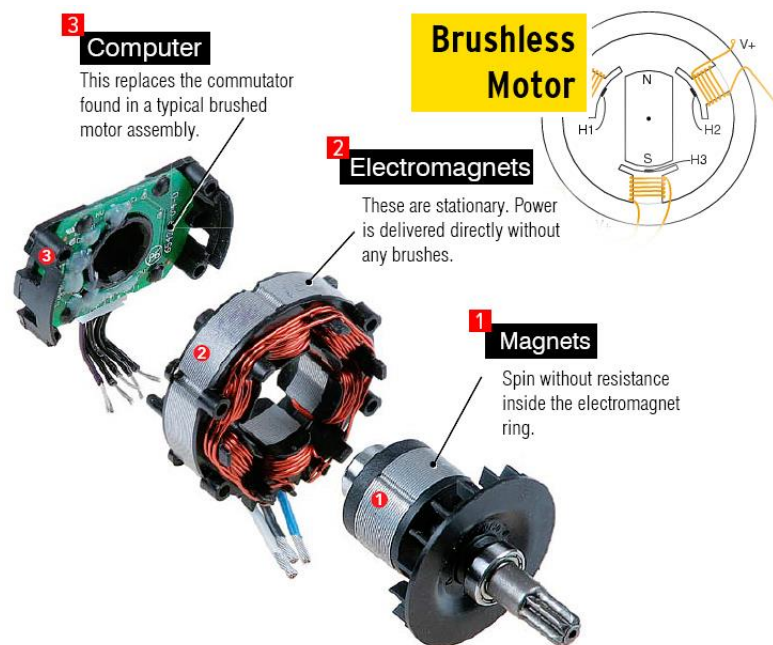


Figura 60. Motor *brushless* em vista explodida (<<https://www.chainsawjournal.com/what-is-a-brushless-motor-and-how-does-it-work/>>, 2019).

2.1.4.2. BATERIAS

Independente das características que o sistema elétrico de um robô tiver, ele irá precisar de uma fonte de alimentação. Em se tratando especialmente de máquinas móveis, as baterias são a escolha para praticamente todos os projetos, salvo projetos específicos que possuam alguma ênfase na autonomia, e que, por isso, podem embarcar algum sistema gerador de energia, como o uso de painéis solares, geradores eólicos ou até mesmo motores à combustão de menor escala alimentando um gerador elétrico.

Chase (2009) define a bateria como “[...] um dispositivo capaz de armazenar energia química e liberá-la na forma de energia elétrica”. A maioria das baterias usadas atualmente são constituídas por células, que é o componente mínimo de armazenamento de carga que forma a bateria. As principais características das baterias são a possibilidade de recarga, a densidade de energia (que é a quantidade de energia que ela pode armazenar por unidade de massa), tensão de operação, resistência interna, taxa de descarga (que é a corrente máxima que ela é capaz de fornecer), a perda de carga quando estocada, também chamada de *shelf life*, a quantidade de energia total armazenada (ou para fins de comparação, a quantidade de energia por célula) e sua relação com a temperatura.

Além disso as baterias têm uma vida útil finita, geralmente mensurada em ciclos de carga e descarga. Essa vida útil não depende apenas do processo construtivo, embora este seja um dos mais relevantes, mas também das características de uso e do correto procedimento de carga e descarga (ARAÚJO, 2012). A correta escolha de uma bateria deve levar, além de suas características, também aquelas da operação em que ela irá trabalhar.

As baterias são classificadas de acordo com os elementos químicos que as formam. Desta forma os principais tipos de bateria são as de chumbo-ácido, lítio-íon, ou Li-Ion, níquel-cádmio, ou NiCd, e as de hidreto de níquel-metal, ou NiMh.

As baterias de chumbo-ácido são as mais comuns em diversas aplicações, especialmente por sua robustez e baixo custo. Segundo Chase (2009), possuem uma densidade de carga relativamente mais baixa que as demais, menos ciclos de vida e um tempo de carga maior. Porém sua resistência interna é menor, ela possui um *shelf life* também menor, o que a torna ideal para ser estocada com carga, uma tolerância alta à sobrecargas, sendo, portanto, mais robusta, uma boa taxa de descarga e uma menor manutenção com relação às de NiCd e as NiMh. A sua maior vantagem, no entanto, é o custo, sendo a mais barata das opções entre baterias equivalentes.

Existem três diferentes tecnologias de baterias de chumbo-ácido: as líquidas, onde o eletrólito fica imerso numa solução aquosa, no interior das células, as de gel, onde o eletrólito fica imerso em um gel, e as AGM (*Absorbed Glass Mat*), onde o eletrólito é envolvido em fibra de vidro. As AGM são mais resistentes à impactos e robustas, enquanto as de gel possuem um rendimento melhor e uma vida útil maior. Ambas são seladas, ou seja, não necessitam de manutenção, e utilizam a tecnologia VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*), onde uma válvula permite o escape dos gases gerados nas reações. As líquidas necessitam de manutenções periódicas e de reposição de água destilada na solução que permeia os eletrólitos. A Figura 61, a seguir, mostra uma bateria de chumbo-ácido usada em automóveis.



Figura 61. Bateria de chumbo-ácido usada para alimentar o motor de arranque e a parte elétrica de automóveis convencionais (<https://www.magazineluiza.com.br/bateria-de-carro-moura-48ah-12v-polo-positivo-48fd/p/220540600/au/baau/>, 2019).

As baterias de lítio-íon, ou Li-Ion, tem ganhado bastante espaço nos últimos tempos, nos mais diversos cenários de projetos de engenharia, como podemos ver na Figura 62 seu uso em baterias para notebook, visto que possuem uma densidade de carga maior que todas as demais, sendo, portanto, mais leves, menores e ainda possuem ciclos de vida longos quando usadas corretamente. Além disso, não sofrem do efeito de memória, ou seja, podem ser carregadas a qualquer carga remanescente sem que isso reduza sua carga total depois. Além disso, elas possuem a capacidade de manter a tensão mais constante ao longo da descarga, o que nas baterias de chumbo-ácido e NiCd tem um efeito mais drástico. No entanto essas baterias são muito mais caras que as demais para valores equivalentes, e necessitam de cuidados especiais na carga, descarga e operação. Se sofrerem choques mecânicos ou forem carregados ou descarregadas rápido demais, elas superaquecem e podem explodir. Também não podem ser estocadas à carga completa, pois podem se danificar com isto.



Figura 62. Bateria Li-Ion multi células usada em notebooks comerciais (<https://www.techtudo.com.br/dicas-e-tutoriais/noticia/2016/02/como-prolongar-vida-util-da-bateria-de-litio-de-notebooks-e-cameras.html>, 2019).

Visando torna-las mais estáveis e com melhor desempenho, foram desenvolvidas variações da bateria Li-Ion, sendo que nas aplicações de robótica merecem destaque as baterias de lítio-polímero (LiPo) e as lítio-fosfato-ferro (LiFe). Nas baterias LiPo, mostrada na Figura 63, os eletrólitos de lítio são envoltos em polímero sólido, o que permite uma construção mais robusta e adaptável à vários formatos, além de possibilitar um carregamento mais rápido e taxas de descargas maiores. Por este motivo são amplamente usadas em robótica móvel, especialmente em projetos de menor tamanho onde o peso é limitante. Porém elas ainda são instáveis quando usadas fora de seus limites ou quando sofrem choques mecânicos. Uma opção mais estável a estes efeitos é a LiFe, onde se usa lítio de fosfato de ferro ($LiFePO_4$) como cátodo. A desvantagem dessas baterias é sua densidade de carga, que é inferior às LiPo, porém são mais seguras em operações mais hostis. Em ambos os casos, no entanto, é recomendado que se use no carregamento e operação um sistema de proteção chamado BMS (*Battery Management System*), que mantém a tensão das células equilibradas, garantindo que uma única célula não fique exaurida antes das demais, o que poderia instabilizar a bateria.



Figura 63. Bateria LiPo para aplicações de robótica e aeromodelismo (<<http://blog.droneng.com.br/baterias-lipo/>>, 2019).

As baterias de níquel-cádmio, ou NiCd, com o desenvolvimento das baterias de lítio, vem perdendo cada vez mais espaço, por terem uma densidade de carga menor e por possuírem o efeito de memória, o que obriga que elas sejam completamente descarregadas antes de nova carga, ou então podem perder capacidade máxima. Todavia ainda são usadas em alguns casos por serem duráveis, leves, relativamente baratas, se comparadas às Li-Ion, e seladas, o que impede vazamentos de materiais químicos nos equipamentos que as usam. Quanto aos cuidados necessários, assim como as Li-Ion, possuem altas correntes de curto-circuito, e, portanto,

podem se incendiar se isto ocorrer. A Figura 64 mostra uma bateria NiCd, tipicamente usada em aparelhos eletrônicos.



Figura 64. Bateria NiCd para aplicações em aparelhos eletrônicos em geral (<<https://pt.rs-online.com/web/p/baterias-recargables-de-tamanos-especiales/3777725/>>, 2019).

Por fim, a bateria de hidreto de níquel-metal, ou NiMh, mostrada na Figura 65, foi desenvolvida visando substituir as baterias de NiCd, como uma nova tecnologia em baterias de níquel. Por usarem este mesmo metal como componente, estas baterias também sofrem do efeito de memória, porém é muito menos impactante que nas NiCd, e se usadas corretamente, seu efeito pode ser até desprezado. Rivalizam com as baterias de Li-Ion na substituição das NiCd, por possuírem densidade de carga maior que essas, além de taxas de carga e descarga maiores e um descarregamento mais profundo, perdendo quanto ao seu ciclo de vida, que é menor que nas NiCd.



Figura 65. Bateria NiMh para aplicação também em aparelhos eletrônicos (<<http://www.volbh.com/detalha.php?id=2174>>, 2019).

2.1.4.3. SENSORES

Em aplicações de robótica móvel, o uso de sensoriamento é imprescindível dada a necessidade de se ter informações que guiem a tomada de decisões, seja do operador no caso de robôs remotamente controlados, seja do controlador no caso de robôs autônomos.

De acordo com Murphy (2000 apud HATA, 2010), podemos classificar os sensores de acordo com o meio em que efetuam suas leituras e de acordo com a forma como as capturam. Segundo a primeira classificação eles podem ser proprioceptivos, quando medem grandezas de componentes do robô (como medir a velocidade ou temperatura interna, por exemplo), ou exteroceptivos, quando a medição é sobre o meio em que o robô se situa (como por exemplo medir a distância até obstáculos ou a humidade do meio). Quanto à segunda classificação eles podem ser passivos, quando apenas recebem os estímulos do meio (como termômetros, câmeras, etc.), ou ativos quando emitem energia no meio e usam-na em suas medições (como sensores ultrassom e laser).

Cada um destes tipos possui suas limitações e vantagens de uso, que devem ser pesadas na escolha de um sensor. Os sensores exteroceptivos geralmente estão diretamente ligados à missão, sendo muitas vezes a carga útil para a qual um robô é projetado. Já os sensores proprioceptivos são em geral, sensores que auxiliam o funcionamento do robô, dando suporte à missão. Eles permitem o controle com realimentação de diversas funções do robô, além de permitir sua inspeção de funcionamento, enquanto em uso.

No caso de robôs que usam motores, sensores proprioceptivos são quase indispensáveis, pois frequentemente necessitamos controlar velocidade e direção destes. Neste sentido, o sensor mais utilizado, segundo Borenstein (1997 apud HATA, 2010) é o odômetro, pois é de baixo custo, possui boa precisão (em distâncias curtas e médias) e uma alta taxa de amostragem do sinal.

Os odômetros permitem a medição de velocidade e distância percorrida do robô. Também é possível através de sua leitura, saber a posição atual do mesmo. Neste sentido, é comum que se use outro sensor em conjunto com o odômetro, pois este acaba acumulando erros ao longo do tempo ao estimar a posição.

Segundo Hata (2010), a construção mais comum de um odômetro são os chamados *encoders* ópticos. Eles são formados por um disco com furos equidistantes, que deve estar à mesma velocidade de rotação do motor a qual irá realizar as medições, um emissor de luz, que irá emitir a luz através dos furos do disco, e um receptor óptico, que irá realizar a leitura dos pulsos de luz emitidas. À medida que o disco gira, o receptor capta um sinal no formato de uma

onda quadrada, uma vez que hora estará no escuro, quando o disco estiver na porção fechada, portanto interceptando a luz do emissor, hora receberá luz, quando o disco estiver na porção que contém o furo, como mostrado na ilustração da Figura 66. Ao contarmos a quantidade de pulsos altos desta onda num dado intervalo de tempo fixo, podemos então obter a velocidade de rotação do disco, que sendo solidário ao eixo do motor, será também a velocidade de rotação do motor.

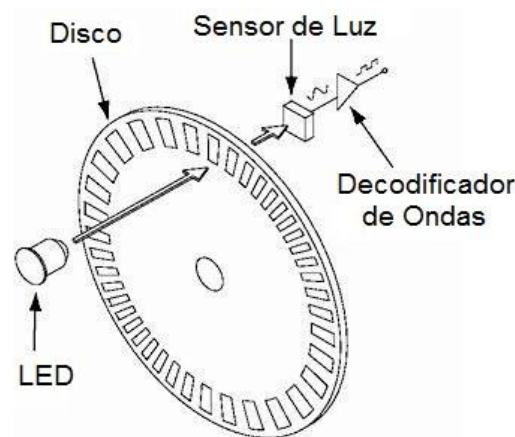


Figura 66. Ilustração simplificada de *encoder* óptico e seu funcionamento (BORENSTEIN, 1997 apud HATA, 2010).

Araújo (2012) complementa sobre os sensores ópticos:

Os sensores ópticos são largamente utilizados em inúmeras aplicações, devido à sua simplicidade de construção, alta resolução com interface digital, alta repetibilidade, por terem uma vida útil praticamente infinita pelo facto de não conterem qualquer tipo de contatos mecânicos. Porém, é um sensor frágil e normalmente necessita de circuitos de interface.

Dito isto, a principal preocupação a se ter com estes sensores é sua construção, de modo a preservar seu bom funcionamento. Por este motivo, usualmente estes sensores são encapsulados em estruturas mais robustas, como o *encoder* da Figura 67, a seguir, a fim de poderem ser usados em ambientes mais agressivos.



Figura 67. *Encoder* óptico com estrutura de proteção IP50, para ambientes com considerável grau de contaminantes particulados (<<https://www.rhmateriaiseletricos.com.br/encoder/encoder-incremental-500-pulsos-e40s6-500-3-t-24/357>>, 2019).

2.2. SIMULAÇÃO E ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

Em um projeto de engenharia, especialmente quando vamos criar alguma estrutura ou componente, ou mesmo testar o funcionamento de uma montagem, o uso de simulação computacional reduz drasticamente os custos e o tempo deste projeto. Antes do advento da computação, era necessário um grande gasto de recursos e tempo com prototipação, uma vez que apesar de serem feitos cálculos e dimensionamentos, a complexidade das máquinas exige a construção prévia dos mecanismos para testar seu funcionamento na prática, pois é difícil prever todos os comportamentos de algum dispositivo. Além disso, os métodos de cálculo analíticos, para muitas geometrias e casos, são inviáveis ou impossíveis de serem aplicados.

Com a computação moderna e o desenvolvimento de algoritmos capazes de simular o comportamento de uma máquina sobre vários aspectos, como o comportamento e distribuição de forças e tensões, comportamento vibracional, comportamento dos fluidos, etc., esse processo sofreu uma revolução, pois agora a prototipação pode ser bastante reduzida, uma vez que a simulação aproxima o comportamento de uma máquina projetada do seu comportamento real.

2.2.1. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

No universo das simulações computacionais, uma das tecnologias mais expoentes é o Método de Elementos Finitos, ou FEM (*Finite Element Method*), também chamado de Análise

por Elementos Finitos, ou FEA (*Finite Element Analysis*). A ideia por trás deste método consiste em dividir um volume que se queira analisar em um conjunto finito de partes contíguas e discretas, de forma que estas sejam simples o suficiente para que possamos usar equações computacionalmente resolvíveis para descrever seu comportamento. Uma vez geradas essas equações, utilizamos métodos de cálculo numérico para resolvê-las, com as condições de contorno dadas. Assim, o método dos elementos finitos permite resolver problemas de deformação, tensão, peso, distribuição de temperatura, etc., para geometrias complexas e casos específicos que fogem aos métodos analíticos padrão.

Segundo Mirlisenna (2016), ao se dividir a geometria de interesse, com suas cargas e condições restritivas, em partes, um problema complexo é dividido em problemas mais simples. Cada parte dessa divisão é chamada de elemento, e juntos representam o domínio contínuo do problema. Como estes têm um número finito, eles dão nome ao método (método dos elementos finitos). Cada elemento deve ter comportamento bem definido, e pode apresentar várias formas, como triangular, quadrilateral, piramidal, etc., em função das características do fenômeno analisado. Os elementos são unidos entre si por pontos, chamados de nós, como podemos ver na Figura 68, onde se mostra em destaque a diferença entre um elemento e um nó.

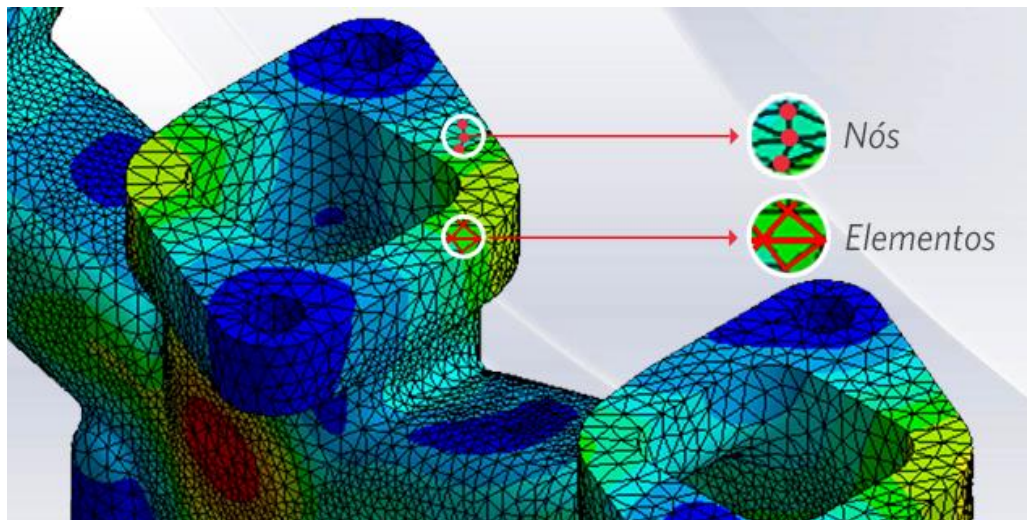


Figura 68. Geometria sob análise, onde se pode ver a diferença entre os nós e os elementos (<<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>, 2019).

A junção de todos os elementos e nós da geometria formam a malha. Essa divisão, no entanto, gera certas imperfeições, e dito isso, o resultado da análise não é exato, mas aproximado. Isso significa que quantos mais nós e elementos, mais preciso será o resultado (MIRLISENNA, 2016).

Além disso, em algumas regiões da geometria, como bordas de furos, rebaixos e ressaltos, quinas, entre outras, as imperfeições no modelo podem ser maiores, especialmente quando os elementos são grandes em relação aos detalhes da peça. Essas regiões também costumam coincidir com pontos de concentração de tensões, onde a probabilidade de falha da peça é maior. Nestes casos, usa-se refinar a malha, como a mostrada na Figura 69, ou seja, localmente reduzir o tamanho dos elementos e aumentar sua quantidade, à fim de produzir resultados mais precisos, uma vez que são regiões críticas.

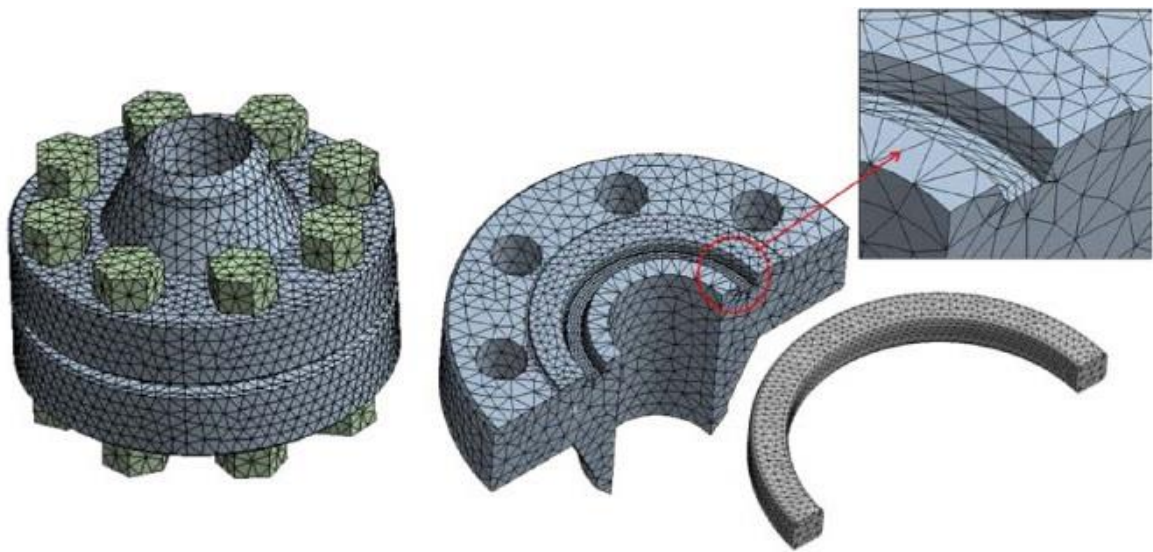


Figura 69. Malha de flange de fixação com enfoque para o refino de malha feito no rebaixo (<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762011000400009>, 2019).

Nos últimos anos os softwares comerciais de análise vem facilitando o uso do FEM, permitindo a importação direta de modelos construídos em softwares CAD (softwares de modelagem e desenho) e a configuração e escolha automática de parâmetros, como por exemplo a escolha do tipo de elemento, a inserção das condições de contorno, a criação da malha, o refino da mesma em pontos onde a análise deve ser mais precisa, e até mesmo sugerindo por exemplo, a localização e tamanho de alívios de peso em peças estruturais.

Sobre o uso destes softwares comerciais, Azevedo (2011) afirma que:

Perante um problema de análise de estruturas e dispondo de um software intuitivo, é perfeitamente acessível a um projectista a obtenção de resultados credíveis, mesmo quando não tem acesso à fonte do código computacional ou quando desconhece as características do modelo que está a utilizar.

Porém, Norton (2013) adverte que “a utilização de softwares comerciais torna muito fácil obter resultados de análises pelo FEA, mas se o usuário não compreender direito como utilizar esta ferramenta de forma adequada, os resultados podem conter erros grosseiros”.

Por este motivo, o próprio Azevedo (2011) reforça:

A tentação para aceitar os resultados provenientes do programa é grande, quaisquer que sejam esses resultados, uma vez que considera que o software escolhido tem elevada qualidade. Os potenciais perigos de uma utilização nestas condições são a não percepção de eventuais erros na introdução dos dados, a ausência de correspondência entre o modelo seleccionado e a estrutura que está a ser analisada, o facto de serem desprezadas importantes condicionantes, etc. Na ausência de uma comparação dos resultados provenientes do MEF com os oriundos de outros modelos, existe o sério risco de a segurança de uma estrutura ser justificada com base em cálculos completamente inadequados.

Portanto é importante que os conceitos por trás do FEM ou FEA sejam conhecidos pelo projetista, mesmo que ele se utilize de softwares de análise comerciais consagrados, e que ele tenha um olhar crítico sobre o resultado retornado pelo software.

Azevedo (2011) levanta ainda os seguintes aspectos a serem considerados antes da análise da estrutural em questão:

- **Análise dinâmica ou estática:** em geral as forças sobre uma estrutura são de natureza dinâmica, e, portanto, é de se esperar que os efeitos dinâmicos devam ser levados em conta em uma análise. No entanto, em muitos cenários é plausível considerar que a aplicação de esforços é suficientemente lenta para que sejam desprezados os efeitos dinâmicos, o que gera uma grande simplificação nos modelos. Quando isso ocorre, a análise é chamada de estática, quando não, é uma análise dinâmica.
- **Análise linear ou não linear:** uma outra simplificação comumente adotada é a de que as deformações da estrutura são pequenas o suficiente em relação às dimensões da mesma, de forma que podemos ignorar seus efeitos na distribuição de esforços e tensões. Quando fazemos essa simplificação a análise é dita linear geométrica, e quando não o fazemos é não linear geométrica. Além disso, também se considera que quanto ao material, a relação entre tensão e deformação é linear, o que leva a ser uma análise linear material, e seu contrário uma análise não linear material.

- Tipo de estrutura: quanto à estrutura, é feita uma classificação geométrica entre elas, também a critério de simplificação. As estruturas podem ser laminares quando sua espessura é muito inferior às demais medidas, se assemelhando à uma chapa ou casca, e reticuladas quando constituídas por barras prismáticas, onde suas transversais são muito menores que seu comprimento, como uma estrutura treliçada. Quando não se encaixam em nenhuma das duas classificações anteriores, são chamadas de estruturas sólidas. Cada tipo de estrutura permite ou não uma série de suposições simplificadoras.

Levando em contas estes aspectos, temos diferentes tipos de análises, segundo as classificações. Destas detalharemos melhor as análises segundo a primeira classificação.

2.2.2. ANÁLISE ESTÁTICA

Na análise estática os efeitos de força de inércia e amortecimento são desprezados pois consideramos, como já citado, que o carregamento será lento o suficiente para tal. Antes de criarmos a malha na geometria precisamos definir as condições de contorno. Estas condições são de dois tipos: carregamentos ou restrições. Os carregamentos como o nome diz, são os esforços às quais a estruturas estará sujeita por ações do meio, e nesse caso consideramos também a força peso, uma vez que a gravidade é uma ação do meio (não confundir força peso com forças de inércia, a força peso é sob aceleração da gravidade, as forças de inércia são sob ação de acelerações impostas).

Como todos os carregamentos serão considerados estáticos, caso haja carregamentos dinâmicos as quais se queira submeter a estrutura, uma simplificação aceitável em alguns casos é o uso de valores estáticos equivalentes aos carregamentos dinâmicos.

De acordo com Belyaev (1979), Higdon et al. (1981) e Stiopin (1968), seguindo-se o princípio de D'Alembert que diz que qualquer sólido em movimento pode ser considerado em estado de equilíbrio instantâneo se, às forças que atuam sobre ele, for acrescentada a força de inércia, podemos simplificar um carregamento dinâmico na forma de uma carga estática equivalente.

Consideremos o cenário em que uma certa massa com peso W cai em queda livre de uma certa altura H , sobre uma viga engastada. Ao atingir a viga este peso provoca uma deformação máxima δ_d . Consideremos também que, conforme exposto, esta deformação pode ser provocada por uma carga estática F_s . Além disso, consideremos que o material em questão

tem o mesmo comportamento estático e dinâmico e que as perdas por calor, som e deformações locais podem ser desprezadas. Assim teremos que a energia efetiva aplicada será igual ao trabalho realizado pela carga estática equivalente. Ou seja, teremos a Equação 5, da seguinte forma:

$$W(H + \delta_d) = \frac{F_s \delta_d}{2} \quad (5)$$

Se substituirmos nesta equação os valores de F_s e W , pelas equações de deformação equivalentes de cada um, e simplificando teremos a Equação 6, que nos dá o fator dinâmico $F.D.$, ou seja quantas vezes a carga estática equivalente será maior que o valor da carga dinâmica, a fim de produzir o mesmo efeito, num carregamento vertical.

$$F.D. = \frac{F_s}{W} = \frac{\delta_d}{\delta} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H\eta}{\delta}} \quad (6)$$

Nesta equação δ é a deformação gerada por W se este fosse aplicado estaticamente e η é um fator de correção que leva em conta a dissipação de energia associada com o tipo de membro elástico sendo impactado, ou seja, a parcela da energia aplicada que realiza trabalho de deformação. Por segurança, podemos considerar que toda a energia aplicada causará deformação, e, portanto, $\eta = 1$. Além disso se $H = 0$, ou seja, a carga é aplicada subitamente, a equação acima pode ser reduzida à $F.D. = 2$, ou seja, nestes casos a carga estática equivalente será duas vezes maior que a carga dinâmica aplicada, caso ela fosse aplicada estaticamente (BELYAEV, 1979; HIGDON et al., 1981; STIOPIN, 1968).

Analogamente temos que, para um carregamento horizontal, o fator dinâmico será (Equação 7):

$$F.D. = \frac{F_s}{W} = \frac{\delta_d}{\delta} = v \sqrt{\frac{\eta}{\delta g}} \quad (7)$$

Nesta equação g é a aceleração da gravidade e v a velocidade no impacto. Esta análise, é claro, assume uma série de simplificações e, portanto, deve-se analisar as condições reais para se validar se poderá ou não ser usada.

Segundo Furtado (2014), uma vez que tenhamos a magnitude das tensões e deformações resultantes da análise estática, podemos aplicar o critério de falha estrutural por deformação elástica. O critério diz que a estrutura deve satisfazer a relação tensão-deformação no estado elástico, em função do escoamento do material. Happian-Smith et al (2002 apud FURTADO, 2014) afirma que a tensão não deve exceder 67% da tensão de escoamento do material, e, portanto o coeficiente de 1,5 pode ser considerado o mínimo aceitável.

Se a tensão máxima na estrutura for 1,5 vezes menor que a tensão de escoamento, ela cumpre a condição de integridade. Se os deslocamentos na estrutura causados pela deformação forem pequenos, então ela cumpre a condição de rigidez. É ideal que ela cumpra ambas as condições.

2.2.3. ANÁLISE DINÂMICA (ANÁLISE MODAL)

Como já referido, na análise dinâmica, efeitos dinâmicos tais como as forças de inércia e o amortecimento devem ser considerados. Nos carregamentos dinâmicos, a magnitude, posição e direção podem variar ao longo do tempo, tornando sua análise altamente complexa.

Nos casos em que se analisa um carregamento dinâmico na forma de um impacto, as Equações 6 e 7 mencionadas anteriormente podem ser usadas para obter-se uma carga estática equivalente, e, portanto, usar a análise estática para avaliação destes carregamentos.

Todavia existe um efeito muito importante a ser analisado, onde as Equações 6 e 7 não podem ser usadas. É o efeito da ressonância, que ocorre quando um corpo é excitado em uma frequência próxima ou igual à frequência natural de vibração do mesmo, que é a frequência na qual ele vibra naturalmente quando excitado e pode vibrar livremente. Este fenômeno leva à deslocamentos excessivos e pode gerar o colapso da estrutura. Rao (2008 apud FURTADO, 2014) afirma que “devido ao efeito devastador que as vibrações podem causar às máquinas e estruturas, testes de vibração tornaram um procedimento-padrão no projeto e desenvolvimento da maioria dos sistemas de engenharia”.

Para se encontrar os modos de vibrar de uma estrutura e suas frequências naturais, realiza-se a análise modal, que é uma análise onde a estrutura é submetida a vibrações livres não amortecidas. Os resultados dessa análise são oriundos das características próprias da rigidez e inércia da peça de interesse, e quando se identificam frequências naturais da mesma próximas

a frequências de trabalho da peça, deve-se modificar sua geometria ou inércia a fim de evitar a ressonância. Moura (2010 apud FURTADO, 2014) afirma que “uma forma de evitar que a estrutura trabalhe em sua frequência natural é alterando a massa ou a rigidez do sistema, através de mudanças na geometria, por exemplo, para deslocar as frequências naturais a valores mais elevados, longe das faixas de frequência nas quais o equipamento trabalha”.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. REQUISITOS E PREMISSAS DO PROJETO

O presente trabalho foi executado sob certas premissas e seguindo a certos requisitos, que levaram à uma solução que não é tecnicamente a melhor solução. Contudo, assim como em qualquer projeto de engenharia, outros fatores tem peso nas escolhas, em especial o fator custo.

A primeira premissa deste projeto foi de que quanto à materiais e componentes, devia se aproveitar o máximo possível àqueles disponíveis no laboratório MAPL (Laboratório de Planejamento Automático de Manufatura) da universidade, onde o projeto foi desenvolvido. Quanto ao que não se encontrasse neste laboratório, os recursos para aquisição seriam providos pelo próprio MAPL, e para que fosse viável, o projeto deveria visar o baixo custo.

Neste sentido, quanto à construção da gaiola, os perfis estruturais foram obtidos no próprio laboratório, e, portanto, seu uso foi um requisito. Outro componente também obtido no laboratório foram os eixos das rodas. Embora a locomoção por rodas não tenha sido um requisito do projeto, sendo, portanto, uma escolha que será justificada na sequência, uma vez tendo feita essa escolha, obrigou-se o uso de eixos, e então foram usados os disponíveis no laboratório. A especificação do eixo tratou-se neste caso da escolha entre as opções disponíveis.

A fim de se utilizar os recursos do laboratório ao invés de adquirir peças no mercado, alguns componentes foram projetados para serem fabricadas no próprio laboratório, usando a impressora 3D.

Outro requisito do projeto foram suas dimensões básicas. Este projeto foi concebido para ser a base de um projeto de doutorado, e assim sendo algumas premissas foram estabelecidas por ele. Este projeto estabeleceu que o robô se moveria nas ruas que se formam entre os pés de café em uma lavoura, e que levaria inicialmente câmeras para sua navegação e obtenção de dados. Além disso, poderia carregar equipamentos extras para a missão em questão, e teria operação autônoma. As dimensões estabelecidas por este para o robô foram baseadas nisso, como sendo: um espaço interno com 700x400 mm de base, e, ao menos no centro dessa base uma altura de 250 mm, e dimensões finais não maiores que um retângulo de 900x850 mm. Além disso especificou-se a autonomia do robô para 50 minutos.

Mas além de servir de base para o trabalho já referido, este robô deveria ser feito para ser utilizado também em outros casos, e por isso teve como requisito ser robusto e adaptável o suficiente para receber customizações futuras. Por este motivo os suportes para a eletrônica embarcada foram feitos com as maiores dimensões possíveis, a fim de permitir uma maior

variedade de equipamentos a serem levados. O espaço interno também considerou uma folga razoável para permitir essas atualizações.

Também foi premissa deste projeto que ele fosse feito para ser usado em ambientes externos, e para tal exigiu que a estrutura suportasse a operação nestes ambientes e que oferecesse uma certa proteção ao espaço interno.

3.2. CONCEPÇÃO DO PROJETO

A concepção do projeto de robô móvel para ambientes externos da qual esse trabalho trata foi elaborada em conjunto com uma equipe multidisciplinar, por meio de diversas reuniões, seguindo os conceitos abordados na fundamentação teórica já descrita e os requisitos anteriormente informados.

O primeiro passo na concepção deste projeto foi a definição do tipo de sistema de locomoção a ser usado. Por ser um robô cujo propósito seria o de carregar câmeras, que iriam além de coletar dados, prover a navegação através de algoritmos de processamento de imagem, quanto menos movimento vertical sua locomoção gerasse seria melhor.

Tendo isto em vista, a locomoção por pernas geraria perturbações constantes na câmera, além de necessitar de uma estrutura mecânica muito mais complicada e potencialmente mais cara, além de uma modelagem cinemática complexa para o controle. Portanto foi descartada, sendo consideradas as opções de rodas ou esteiras.

As esteiras possuem a vantagem de ter melhor desempenho em ambientes escorregadios ou que atolam, por distribuírem melhor o peso, mas dada a complexidade de seus mecanismos, o projeto poderia ser inviabilizado, especialmente no que tange ao custo. Portanto, foi definido o uso de rodas, sendo mais versáteis, simples e tendo bons resultados contra obstáculos e em terrenos irregulares, desde que preparadas para isso.

Como as dimensões do robô deveriam seguir o requisito, a quantidade de rodas ideal seria de 4 ou 6 rodas. Optou-se por 4 rodas para simplificar o modelo e porque as duas rodas extras não trariam suficiente melhoria nas aplicações esperadas.

Quanto à configuração do sistema de locomoção, como explicado na seção 2.1.2.1 que trata de locomoção com rodas, foi definido o uso da configuração diferencial, por dispensar peças móveis nas junções entre eixo de tração e rodas, um controle mais simples e com resultados satisfatórios, e pelo terreno de uso permitir o arrastamento das rodas em um giro.

Quanto à estrutura, a configuração de gaiola foi escolhida por oferecer rigidez e proteção dos componentes internos, mesmo em um cenário de tombamento, não raro nas circunstâncias

de uso do robô. A gaiola foi projetada com perfis estruturais de alumínio conforme o mostrado na Figura 70.

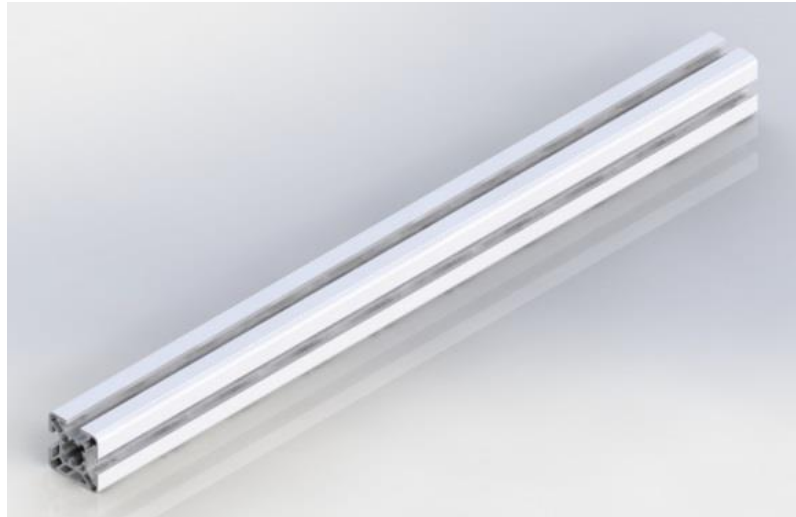


Figura 70. Renderização do perfil estrutural usado.

Estes perfis possuem alma quadrada com dimensões 30x30mm. O desenho da alma é aberto com canaletas, como podemos ver na Figura 71, o que facilitou a fixação de outras peças e montagem entre perfis, e possui alívios para reduzir peso, que não tem grande impacto na resistência.



Figura 71. Desenho do perfil estrutural em corte, mostrando o formato da alma.

Para junção dos perfis foram usadas cantoneiras de alumínio, feitas para este propósito, como a mostrada na Figura 72.



Figura 72. Cantoneira de alumínio para montagem de perfil estrutural (<<https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/metais-e-artefatos/petroval/produtos/acessorios/cantoneiras>>, 2019).

Estas cantoneiras se mostraram mais práticas de se trabalhar que outras conexões, como as placas de conexão interna e os conectores universais, além de serem expressivamente mais baratas, e foram usadas na maior parte das junções.

O desenho da gaiola foi feito no SolidWorks®, software de CAD (*Computer-Aided Design*), bem como o desenho de todo o projeto, incluindo as montagens. Este desenho foi feito segundo o requisito de espaço interno, e como os perfis são de 30 mm de largura, as dimensões da gaiola ficaram em 760x460x310 mm. Foi definida uma área de 400x380 mm no centro da base do robô para se ter a altura máxima, considerada suficiente para acomodar os componentes internos, levando em conta também as possíveis expansões. A partir dessa área os cantos do teto do robô foram chanfrados a fim de reduzir peso, de forma que nas extremidades do comprimento do robô a altura interna seria de pelo menos 100 mm, para acomodar a transmissão e outros componentes. Para este chanfro os perfis foram cortados à 45°, por ser mais fácil encontrar conectores para esta angulação, tanto no perfil inclinado, quanto no vertical e horizontal, a fim de o desenho externo da gaiola ser contínuo. Na concepção original, as junções à 45° também usariam cantoneiras, porém optou-se pelo uso dos conectores universais nestes casos por travarem o movimento relativo de rotação entre as peças. A gaiola final ficou como mostrado na Figura 73.

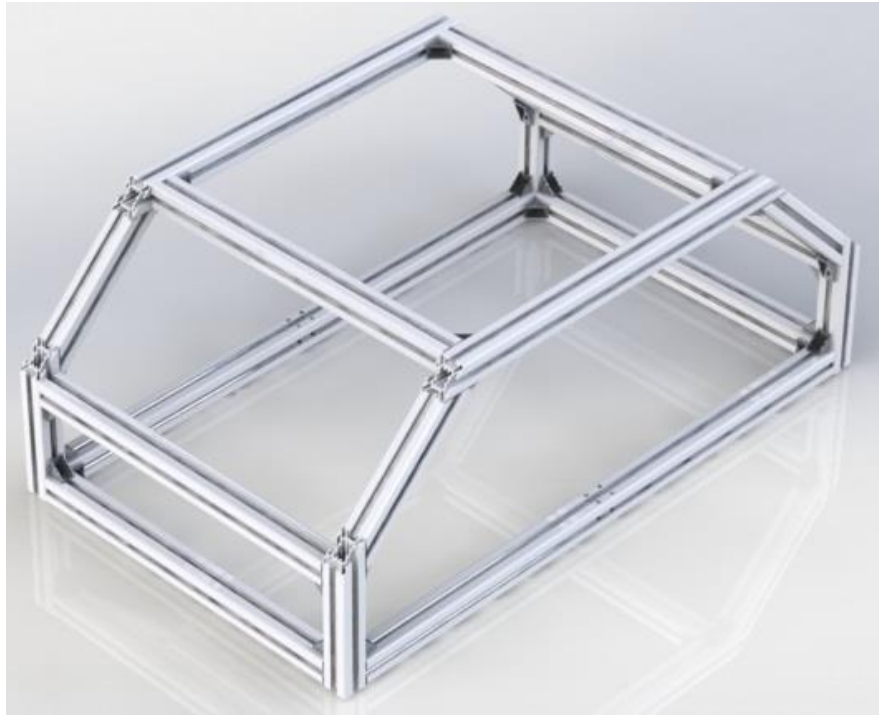


Figura 73. Renderização da gaiola da estrutura do robô.

Como visto na revisão bibliográfica, uma estrutura como esta, por usar formas quadradas e retangulares, é muito suscetível às deformações diagonais, e necessita de travamentos para o aumento da rigidez. O uso de chapas metálicas fechando a estrutura foi adotado como forma de travamento, já que além de apresentar resultados de aumento de rigidez similares ao travamento diagonal, ainda provê a selagem do ambiente interno, protegendo os componentes de poeira, humidade, etc. Na estrutura da gaiola foi usado o travamento por barras apenas nas arestas formadas pelo chanfro, ali presentes não com o objetivo de aumentar a rigidez à torção ou flexão da estrutura, mas para reforço contra impactos, já que estas arestas são os locais de impacto com obstáculos mais prováveis do robô na colisão frontal e no tombamento.

As chapas de fechamento da estrutura foram especificadas em aço, por ser mais rígido que o alumínio, e, portanto, mais resistente a se amassar ou deformar em um choque com obstáculo. Foram chapas com 2 mm de espessura, suficiente para a necessidade, e para se evitar o uso de muitas peças, o fechamento foi feito com 4 chapas, sendo duas laterais, no desenho da gaiola, uma chapa no fundo, para fechar por baixo, e uma superior, que foi dobrada para se encaixar no perfil chanfrado. Podemos ver na sequência, nas Figuras 74, 75 e 76, as renderizações das 3 chapas (as duas laterais são iguais).

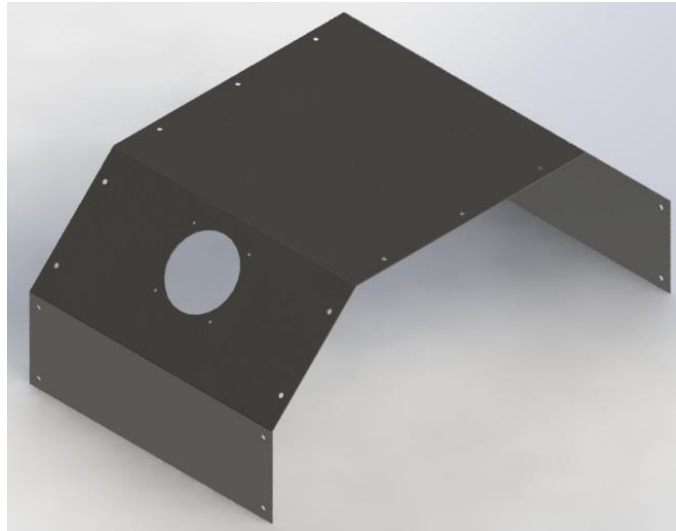


Figura 74. Renderização da chapa de fechamento superior.

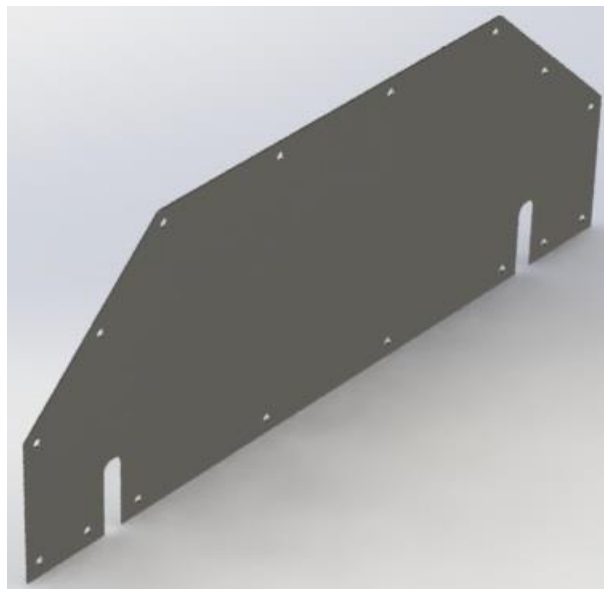


Figura 75. Renderização da chapa de fechamento lateral.

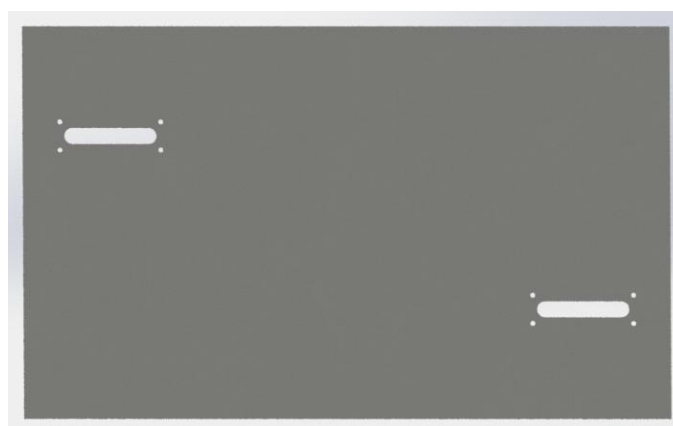


Figura 76. Renderização da chapa de fechamento inferior.

Na chapa inferior podemos notar dois rasgos próximos às extremidades. Eles foram feitos porque a coroa maior usada na transmissão ultrapassava as dimensões internas, e teve que passar para baixo do robô. Na chapa lateral também temos rasgos, na região onde os eixos irão passar, para permitir que sejam montadas por cima, conforme podemos ver na Figura 77, da estrutura fechada. Esses rasgos deixaram uma entrada para o interior, que deverá ser fechada, porém isto será melhor tratado na seção 5, de projetos futuros. Na chapa superior existem dois furos, um em cada chanfro. Esses furos são rodeados de furos menores, feitos para a fixação de *coolers* para ventilação do interior, já que o robô é fechado. Os furos foram feitos para *coolers* de 120 mm, que facilmente chegam aos 50 CFM de fluxo de ar, o que pode ser considerado suficiente, já que são dois. A questão da ventilação forçada também será melhor tratada na seção 5.

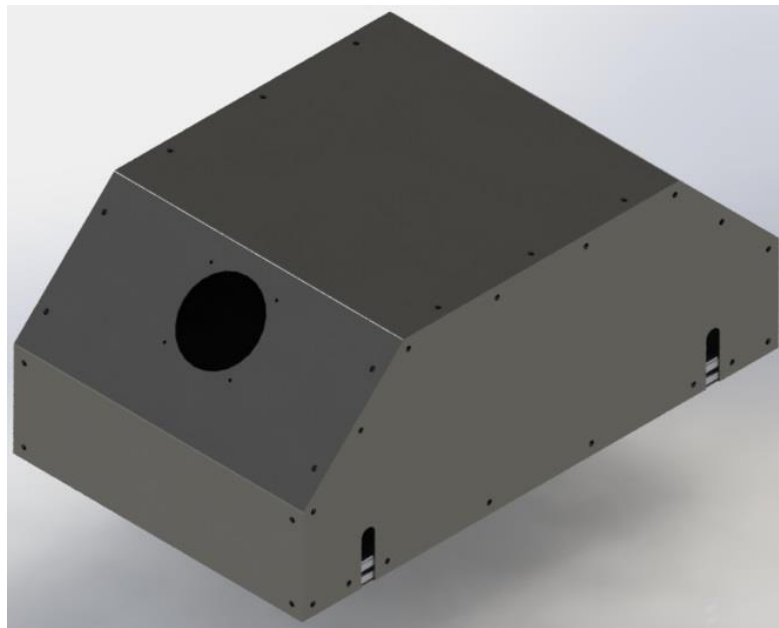


Figura 77. Renderização da gaiola fechada com todas as chapas.

Para a fixação das chapas foram especificados parafusos M8 de aço liga com grau de resistência 12.9 (resistência à tração de 1220 N/m² e limite de escoamento de 1098 N.mm²) para serem usados com arruelas de pressão. Para facilitar a montagem foram especificadas porcas de encaixe para canaletas de perfis estruturais, com molas para se fixar no lugar.

Uma vez estabelecida a estrutura externa, foi montada sobre a gaiola, internamente, uma chapa na base do robô para servir de fixação para todos os demais componentes. Para a chapa em questão foram analisadas duas possibilidades: o uso de uma chapa de aço de 2 mm de espessura ou uma chapa de alumínio com 3 mm de espessura. A chapa de alumínio foi escolhida

por ser mais leve que a de aço e possuir uma resistência próxima, considerando a diferença de espessuras. Nesta chapa foi feita toda a furação para fixação de componentes, como podemos ver na Figura 78.

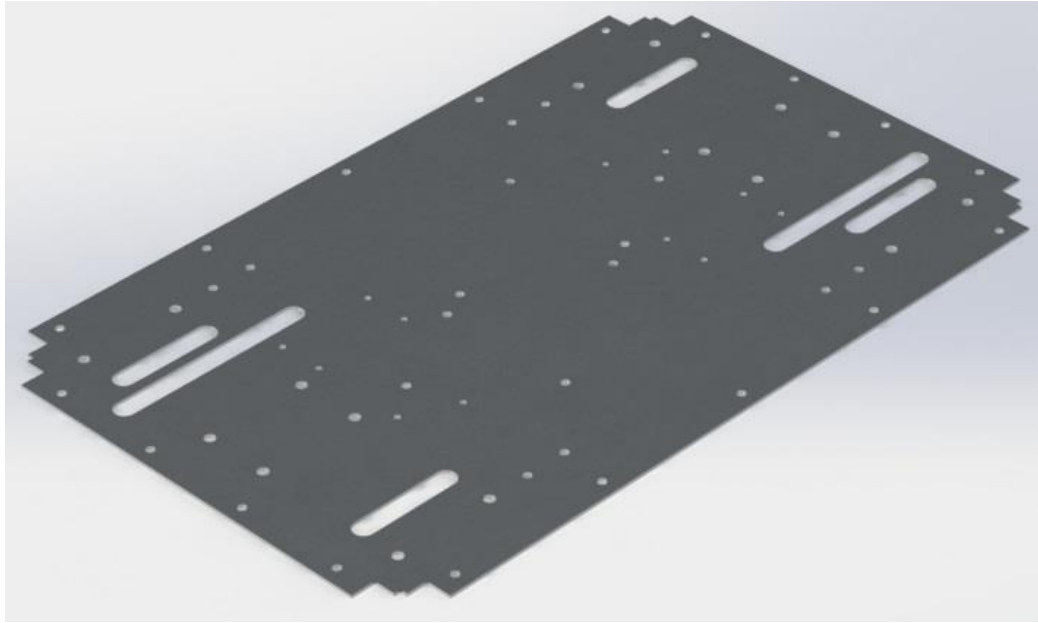


Figura 78. Renderização da chapa de fixação dos componentes.

Além disso, as quinas foram recortadas para encaixe nas cantoneiras, e foram feitos rasgos na chapa para as coroas e catracas da transmissão, que serão mostradas melhor na sequência. Esta configuração da chapa se deu apenas no fim do projeto, quando todos os componentes já estavam sendo considerados.

O próximo passo foi a especificação dos eixos das rodas. Como foi definido um sistema de locomoção por rodas com tração diferencial, os eixos precisavam ser separados para cada roda, já que cada lado teria sua própria motorização. Assim seriam 4 semieixos a serem usados, e para fixá-los, dois mancais por eixo, para evitar que o eixo fosse uma viga em balanço nos dois sentidos.

As opções de eixos disponíveis eram duas barras maciças de aço, uma com 20 mm de diâmetro e outra com 17 mm, e duas barras vazadas, também de aço, uma com 20 mm de diâmetro externo e 12 mm interno, e outra com 20 mm de diâmetro externo com 15 mm interno. Para a escolha da dimensão a ser usada, foram feitas análises estáticas, a critério de comparação, entre os eixos, utilizando o software Ansys®. Na análise, os eixos modelados no CAD, com as dimensões em que seriam usados, foram engastados em uma extremidade, e na outra foram aplicados dois carregamentos, com valores arbitrariamente escolhidos, e bem superiores aos de

trabalho da peça. Foi aplicado um carregamento cortante na extremidade livre do eixo, com magnitude de 5000 N (aproximadamente 510 kgf), e um carregamento torsor na mesma extremidade com magnitude de 15 N.m (aproximadamente 153 kgf.cm). Os resultados obtidos podem ser encontrados na seção 7, anexo I. Como se esperava, as menores deformações foram encontradas no eixo de 20 mm de diâmetro, com deformação máxima de cerca de 1,7 cm. O eixo vazado com 200 mm de diâmetro externo e 12 mm interno apresentou um resultado próximo, com deformação máxima de cerca de 1,9 cm. Já os demais apresentaram deformações significativamente maiores, não sendo, portanto, opções viáveis. Numa relação de custo benefício, o eixo vazado poderia ser a melhor opção, pois atingiu níveis de deformação próximas com uma redução de cerca de 36% do peso. Porém o eixo maciço acabou sendo escolhido por segurança, uma vez que a redução de peso, embora significativa (cerca de 1,2 kg a menos), não justificaria a perda de resistência (cerca de 11% menor), ao se considerar a estimativa de peso final do robô (estimou-se cerca de 70 kg no começo do projeto). Além disso o eixo é uma das peças mais solicitadas da estrutura e, portanto, considerou-se o uso da opção mais resistente possível.

Escolhido o eixo, foram especificados os mancais UCP204 de ferro fundido cinzento, sendo mancais de rolamento por serem comercialmente mais fáceis de se encontrar na medida desejada, suportarem cargas tanto axiais quanto radiais e serem robustos o suficiente para a aplicação. Além disso, eles possuem parafusos prisioneiros para a fixação do eixo, facilitando a montagem. Os mancais foram posicionados de forma a que houvesse entre eles espaço suficiente para a instalação dos componentes da transmissão. Uma nova análise foi feita, desta vez considerando o eixo montado sobre os mancais, e para as mesmas condições anteriores, a deformação máxima caiu pela metade (cerca de 0,8 cm), como esperado.

Para fixação dos mancais na chapa de fundo foram especificados parafusos de aço M10 com suas porcas e arruelas largas para travamento das porcas no verso da chapa.

Na sequência foi especificada a roda, mostrada na Figura 79. Foram escolhidas rodas com calos, para melhorar a tração na terra, com um diâmetro de 32 cm, a fim de manter o fundo dos chassis à 96 mm do chão, permitindo a este superar a maior parte dos obstáculos em sua operação.



Figura 79. Roda escolhida renderizada.

Os eixos foram posicionados de forma que as rodas ficassem à frente do robô, para permitir a este escalar em obstáculos maiores sem esbarrarem na estrutura. Como podemos ver na Figura 80, as rodas serão provavelmente o primeiro ponto de contato com obstáculos em qualquer direção.

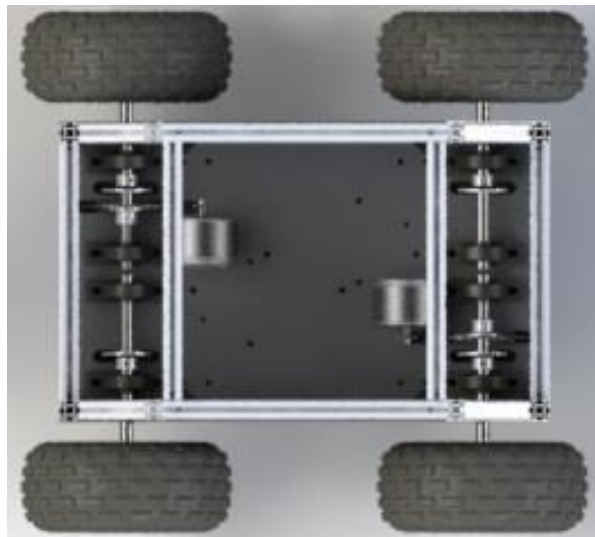


Figura 80. Renderização da vista superior do robô aberto.

Definiu-se que não seria usado um sistema de suspensão, dada sua complexidade, que certamente incrementaria o custo final do projeto. Além disso o amortecimento dos pneus foi considerado suficiente para o caso, como é comum em projetos dessa natureza, sendo não tripulados e, portanto, o conforto proporcionado pela suspensão é dispensável.

Os motores usados foram motores de corrente contínua convencionais, escolhidos pelo custo mais baixo que os *brushless* e controle simples, com robustez suficiente para aplicação. Esses motores são tipicamente usados em *scooters* elétricas, onde é usado um único motor. Neste projeto foram usados dois motores, um de cada lado, a fim de permitir a movimentação diferencial, sendo que cada motor provê tração para duas rodas. A Tabela 1 mostra as principais características do motor escolhido. Para fixá-los na chapa os próprios motores já possuem abas soldadas em sua estrutura, facilitando o processo.

Tabela 1. Características principais do motor ZY1016 (dados fornecidos pelo fabricante).

Condição de referência	Torque (N.m)	Velocidade de rotação (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
À vazio	-	3450	24	1,8	-
Com Carga	1,21	2750	24	18,7	350

Para o sistema de transmissão foram usadas correntes por suportarem ambientes hostis, serem mais baratas que engrenagens, não possuírem escorregamento e terem bom desempenho em curtas distâncias entre eixos. O sistema de transmissão se dividiu em duas partes, uma para transferir a rotação do motor para o eixo, com uma relação de redução, e outra para transferir a rotação entre eixos. Isto porque cada motor fornece tração à duas rodas, uma vez que dado o ambiente de trabalho, a tração nas quatro rodas é um diferencial para se vencer obstáculos.

A corrente especificada foi a TEC C30 de aço, mostrada na Figura 81, com dimensões 1/2"x3/32" polegadas, escolhida por ser compatível com as coroas e catracas especificadas, sendo tipicamente usada em competições de ciclismo de montanha, e, portanto, uma corrente resistente.



Figura 81. Corrente de aço especificada (<<https://isapa.com.br/pecas-e-componentes-corrente-corrente-12x332x116-c30-67v-pto/D12/item5594/cc4/gp3013>>, 2019).

Os motores foram posicionados em diagonal, como podemos ver na Figura 82, um em cada extremidade do robô, para deixar a distribuição de peso o mais homogênea possível.

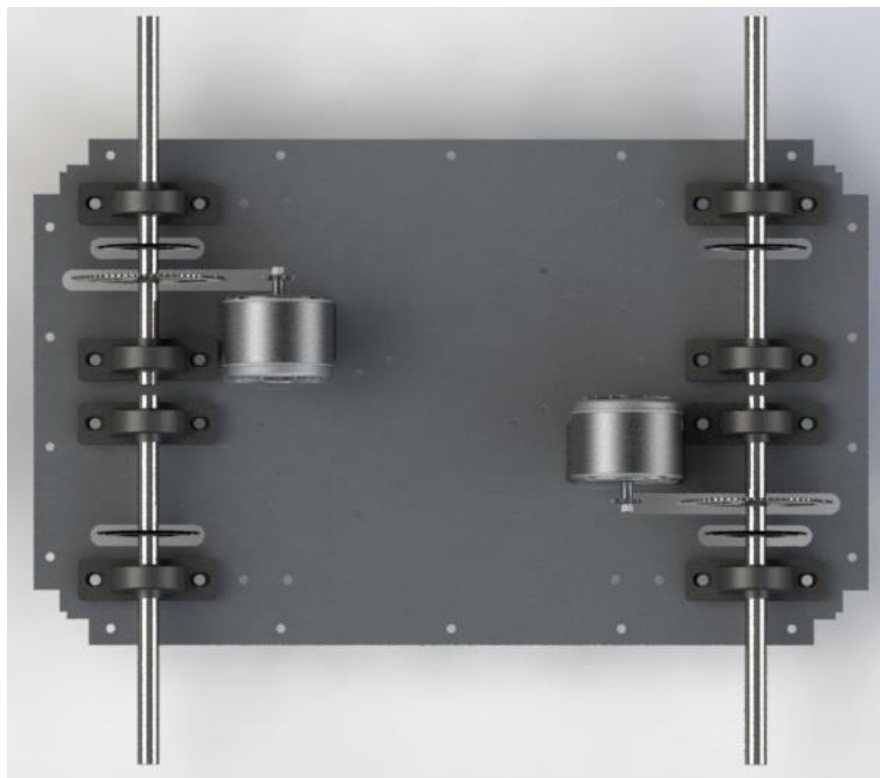


Figura 82. Renderização da vista superior da chapa de fixação dos componentes, com os motores e transmissão montados.

A relação de transmissão do motor para o eixo da roda foi especificada de acordo com o torque adequado para prover boa tração no solo, sendo que a recomendação do fabricante do motor indicava o uso de relação de 6:1, considerada uma boa relação para o uso de correntes e

capaz de garantir um torque de 7 N.m (considerando 96 % de eficiência na transmissão, conforme documentação sobre correntes), o que resulta numa força de reação com o solo de 21,9 N ou 2,2 kgf (desprezando escorregamento e possíveis perdas), garantindo tração suficiente mesmo em solos difíceis. Como a catraca do motor (já fornecida com este) possuía 11 dentes, foi especificado uma coroa com 69 dentes, valor mais próximo encontrado para uma coroa de bicicleta, usada por ser mais facilmente encontrada e mais barata do que rodas dentadas de outras aplicações. Como podemos ver na Figura 83, na sequência, o tamanho da coroa ultrapassou a distância do eixo à chapa, e para sua passagem foram feitos rasgos na chapa de fixação e na chapa de fundo. O motor foi posicionado o mais próximo possível da coroa para reduzir a corrente, e por seu eixo estar acima do nível do eixo da coroa, o abraçamento nesta foi favorecido. Por conta disto, a corrente ficou exposta no fundo do robô, e para evitar danos à esta foram feitos protetores de corrente que serão melhor tratados mais adiante.

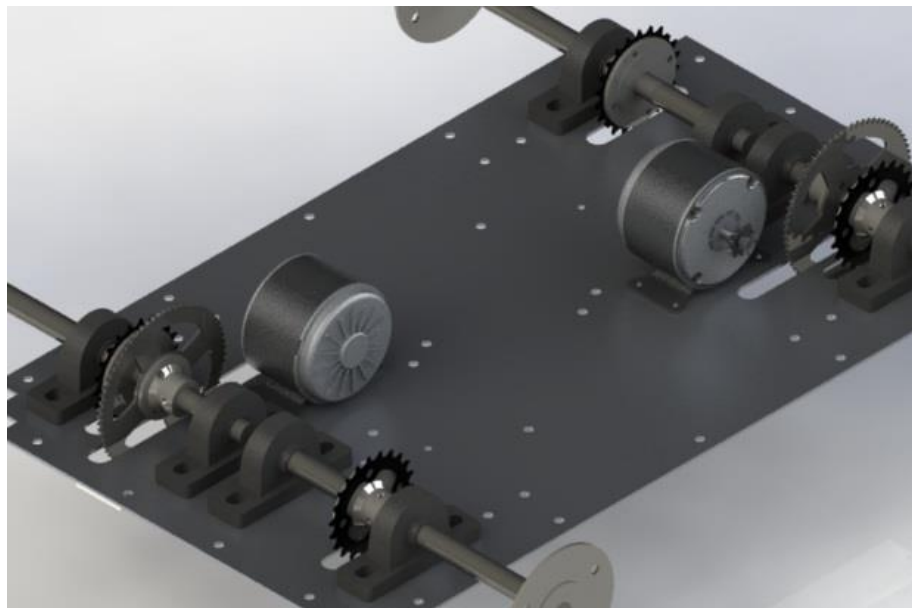


Figura 83. Renderização do sistema de transmissão montado (sem as correntes).

Para transmissão de um eixo ao outro foram usadas duas coroas iguais, já que as rodas do mesmo lado devem girar à mesma velocidade, caso contrário ele não conseguirá andar em linha reta. Seu tamanho foi de 23 dentes, escolhido para manter a corrente numa área compacta, e assim como a anterior, também usada em bicicletas. Como mostrado na Figura 83, essas coroas foram montadas de forma que as correntes passassem por baixo da chapa do assoalho (chapa de fixação), ficando no vão entre esta chapa e a chapa de fundo, otimizando o espaço interno. Além disso elas foram posicionadas o mais longe possível do centro do robô, liberando a maior área possível para os outros componentes.

Com a redução dada de 6,3:1 (vide Equação 4) e trabalhando com a rotação de 2750 rpm do motor, a rotação do eixo da roda será de 436,5 rpm ou 7,3 rps. Considerando a circunferência da roda como sendo 32 cm (sua circunferência terá, portanto, 100,5 cm), e desprezando o escorregamento, a velocidade máxima do robô será de 7,3 m/s ou 26,3 km/h. No entanto, este motor pode operar com velocidades menores, a depender do controle feito.

Dada a versatilidade das correntes em distâncias curtas e longas, foi possível de se as usar tanto para a transmissão entre eixos, com 553 mm de distância entre centros, quanto para transmissão entre eixo e motor, com 119 mm.

Para acoplar as coroas nos eixos foram feitos acoplamentos parafusados, de aço, com flanges sob medida para se aparafusar as coroas, como os que podem ser vistos na Figura 84. A fixação por parafusos foi escolhida por ser mais prática de montar e de se fazer ajustes, ao mesmo tempo em que a furação no eixo para o parafuso é muito mais simples de ser feita do que um rasgo de chave. Para evitar o afrouxamento por vibração foi feita um furo no eixo, a fim de parafuso o cavar. Também foram especificados parafusos sem cabeça, mais fáceis de serem aprisionado no furo. Os cubos das rodas foram feitos da mesma forma, como acoplamentos parafusos com flanges, nas dimensões da roda.

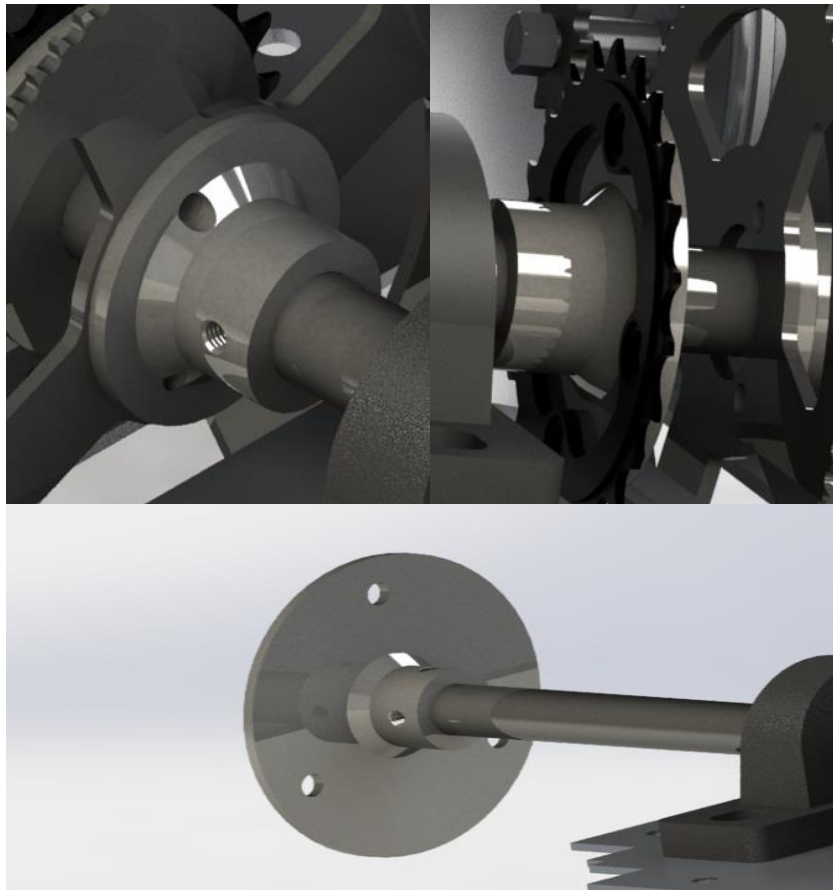


Figura 84. Acoplamentos para as coroas (acima) e cubo das rodas (abaixo).

Para alimentar os motores foram escolhidas as baterias de chumbo-ácido, por sua robustez e capacidade de suportar sobrecargas e curtos, sem se instabilizar, e por seu baixo custo. Além disso foi escolhida uma bateria do tipo AGM, mais resistente e que dispensa manutenções. Para entregar a autonomia de 50 minutos, considerando o consumo de 18,7 A pelo motor, seria necessária uma carga de pelo menos 15,6 Ah; quanto a tensão da bateria deveria ser de 24 V (tensão de alimentação dos motores), para dispensar transformações de tensão à alta corrente, o que gera aquecimento, componentes grandes e muitas perdas. Sabendo das perdas existentes e considerando-se as restrições de dimensão, foi escolhida a montagem com duas baterias Moura Moto MA18-D de 12 V e 18 Ah, como a mostrada na Figura 85, tipicamente usadas em motos e *jet-skis*, ligadas em série, fornecendo os 24 V para os motores. Com esta bateria a autonomia máxima seria de 58 minutos, idealmente, o que sabe se que não é a realidade. Mas, como a alimentação será direta, sem transformações, e essas baterias irão suprir apenas os motores, a autonomia de 50 minutos é plausível. Como os motores elétricos tendem a induzir ruídos na rede, a eletrônica e controle do robô deverão ser alimentadas à parte, sendo essa alimentação não especificada aqui.



Figura 85. Bateria Moura MA18-D (<<http://awrbateriascanoas.com.br/bateria-moto/bateria-moura-moto-jet-ski-18ah-ma18-d-antiga-ma20-d-selada-ref-yuasa-ytx20l-bs>>, 2019).

As baterias foram montadas diagonalmente também, como podemos ver na Figura 86, opostas aos motores, para melhor distribuir o peso, uma vez que junto com os motores, são os componentes mais pesados. Sua fixação será discutindo mais adiante.

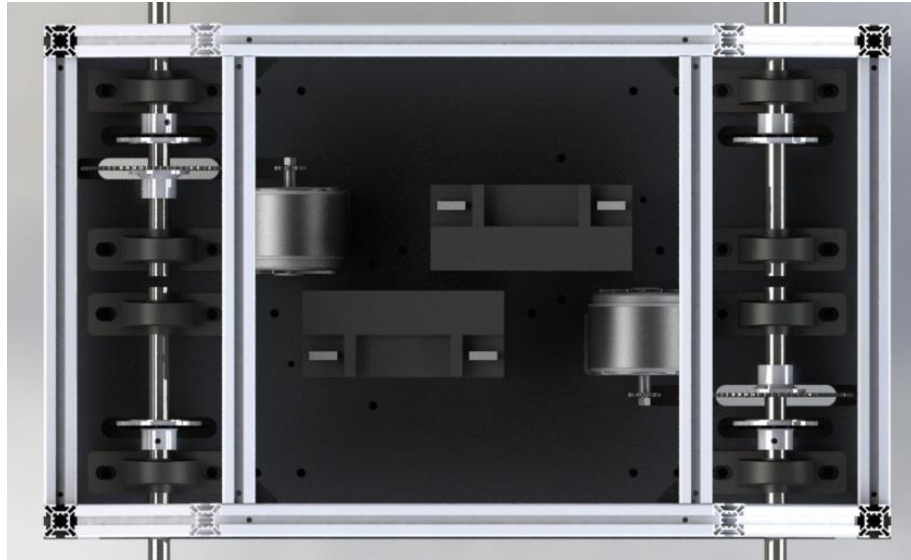


Figura 86. Renderização da montagem das baterias.

Para a leitura de rotação do eixo da roda, foi usado um *encoder* óptico disponível no laboratório. Para transmitir a rotação do eixo até o *encoder* foi acoplado neste um pequeno eixo de aço com 6 mm de diâmetro. Para transmitir deste eixo ao eixo do motor foi especificado um jogo de polias com uma correia dentada de borracha, como mostrado na Figura 87, ideal para sincronizar rotações sem escorregamento, sendo a solução mais disponível para a dimensão de eixo usada. As polias usadas tem as mesmas dimensões externas, portanto não há relação de ganho, mas os furos internos são diferentes, um para eixo de 20 mm e outro para eixo de 6 mm, e ambas as polias acopladas no eixo por parafusos prisioneiros, como os demais acoplamentos usados.

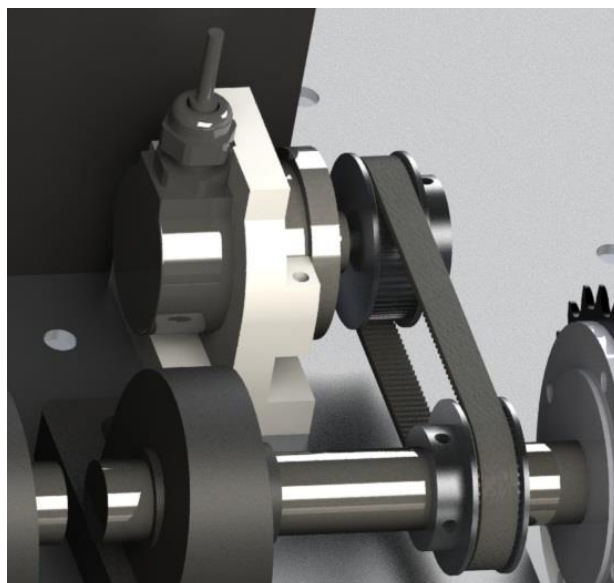


Figura 87. Renderização da montagem do encoder no eixo.

Como parte do requisito, as seguintes peças foram especificadas para serem feitas em impressão 3D, utilizando o plástico ABS, com alta densidade para se conseguir resistência, e mesmo assim resultando numa solução leve. Para a fixação destas peças nas chapas foram especificados parafusos M6 de aço com porca e arruelas de pressão.

Para fixar o *encoder* na altura do eixo foi feito um suporte bipartido com um pé alto e abas para parafusá-lo na chapa, como na Figura 88. A parte de cima é encaixada na parte de baixo em apenas um sentido do *encoder*, evitando uma montagem errada deste.

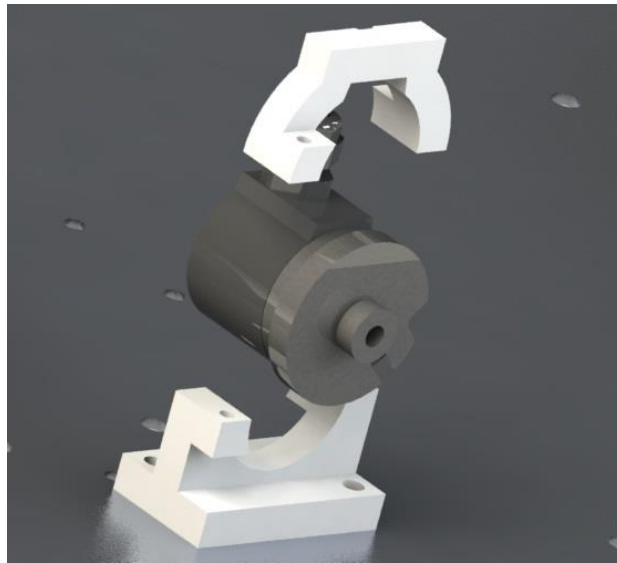


Figura 88. Renderização do suporte do *encoder*.

Para as baterias foi feito um suporte em três peças, sendo uma alça com abas de parafusamento para segurar a bateria na chapa no caso de tombamento, e dois suportes, um de cada lado da bateria, para evitar que ela escorregue, como visto na Figura 89.

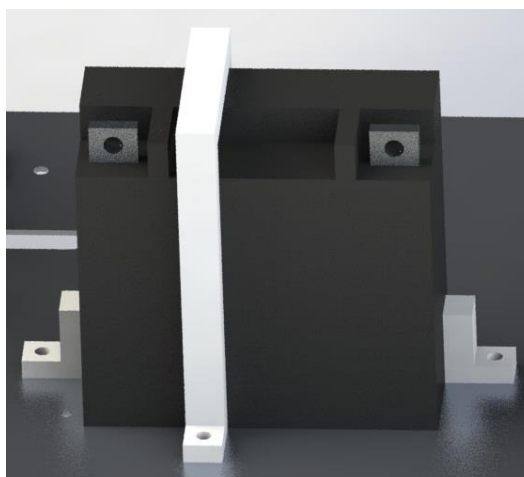


Figura 89. Renderização dos suportes da bateria.

Como já citado, o tamanho da coroa fez necessário abrir rasgos nas chapas, deixando esta e a corrente exposta na parte de baixo. Para protege-las de impactos foram feitos protetores de corrente, um de cada lado, mostrados na Figura 90, tampando os rasgos e deixando um vão interno suficiente para a passagem da corrente com folga. Eles foram feitos com espessura considerável, para suportar impactos sem deformar ou quebrar e com abas para serem parafusados em baixo da chapa de fundo, sendo o ponto mais baixo do robô.

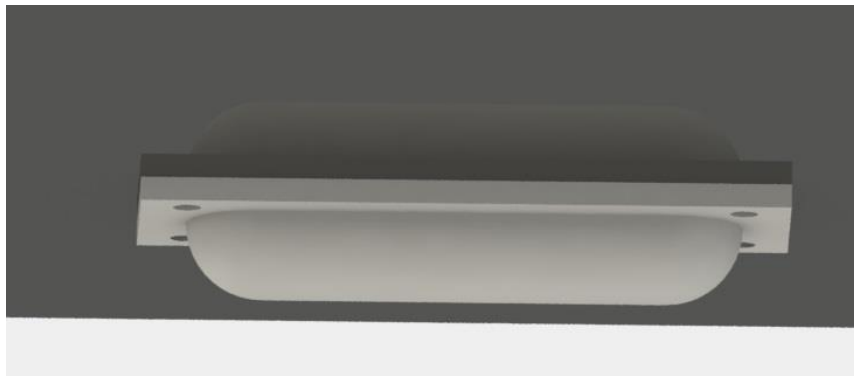


Figura 90. Renderização dos protetores de corrente.

A fim de isolar a eletrônica e controle do robô dos motores e da transmissão, foi feito um andar em separado, acima das baterias, para se fixar os componentes eletrônicos e os mais sensíveis. Para sustentar este andar foram feitas 4 torres grossas, com abas duplas no sentido de movimento do robô para segura-las quanto à flexão no arranque ou freio. Essas torres são parafusadas na chapa de fixação e na chapa do andar de eletrônica, colocado no espaço central do robô, na região com altura de 250 mm, que coincide com a altura dos furos para a ventilação forçada, destinada aos eletrônicos.

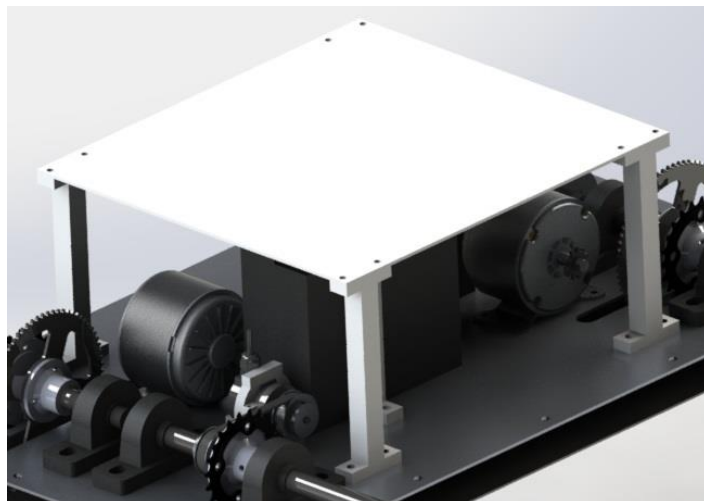


Figura 91. Renderização das torres de suporte e do andar de eletrônica.

Por fim, o resultado final do projeto pode ser visto nas renderizações a seguir, nas Figuras 92, 93, 94 e 95.

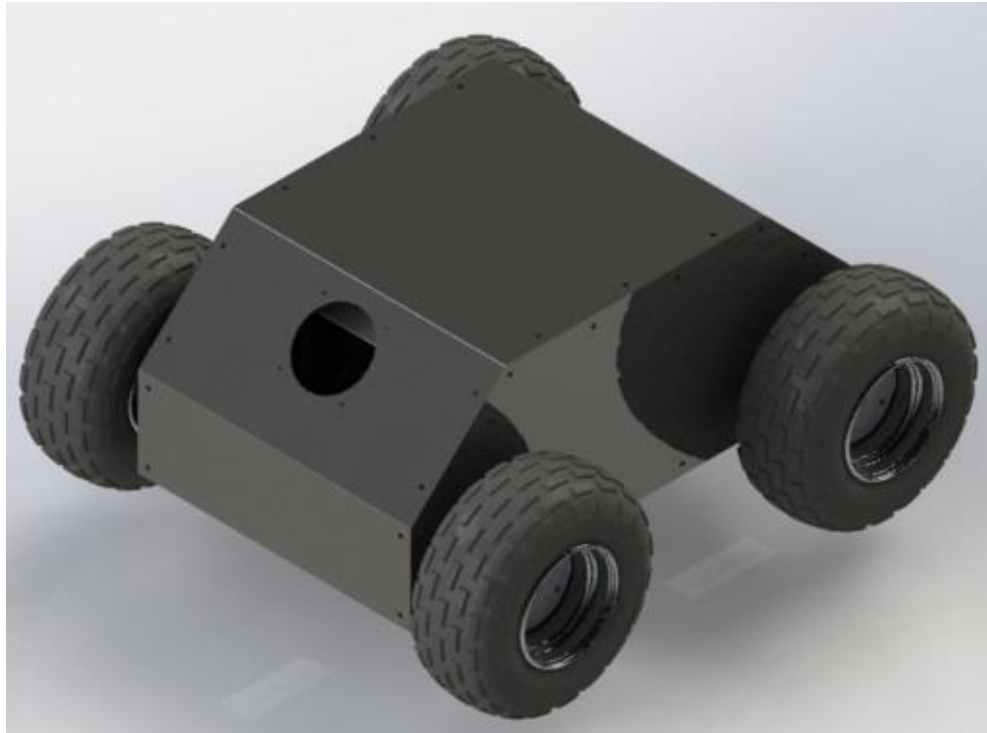


Figura 92. Renderização final do projeto fechado.

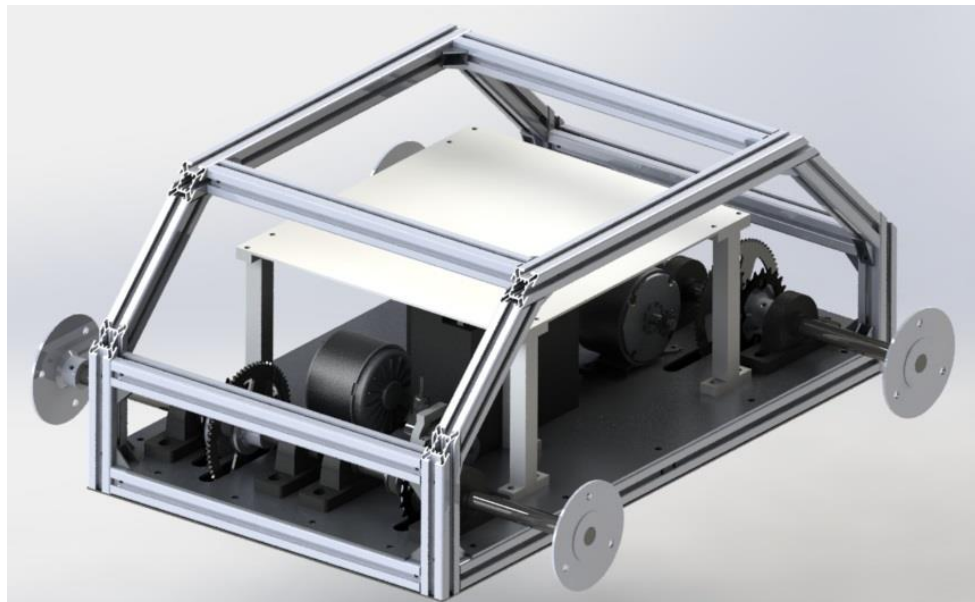


Figura 93. Renderização final do projeto aberto (sem as chapas de fechamento e pneus).



Figura 94. Renderização final de vista lateral do projeto.



Figura 95. Renderização da vista inferior do projeto, mostrando os protetores de corrente.

3.3. PROTOTIPAGEM

Tendo sido especificados os componentes, eles foram sendo adquiridos aos poucos para a construção do protótipo. Como já mencionado, os recursos para compra dos equipamentos foram providenciados pelo próprio laboratório, e o custo para construção do protótipo no seu estado atual foi de R\$4763,83, incluindo peças e serviços. Os motores (Figura 96), foram comprados logo no início, pois sua entrega demoraria por serem via importação.



Figura 96. Motor brushed (com escovas) de corrente contínua para a tração do robô.

Os perfis foram montados no laboratório, com o uso do ferramental lá disponível, tão logo chegaram as cantoneiras e parafusos. Nas Figuras 97 e 98 podemos ver a montagem com cantoneira e a com o conector universal.



Figura 97. Montagem dos perfis com cantoneiras.

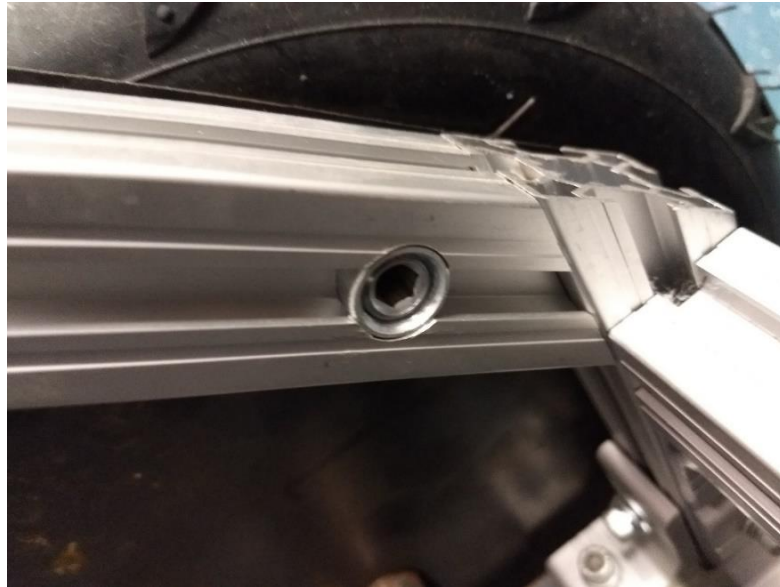


Figura 98. Montagem dos perfis com conector universal.

As chapas de fechamento e a de fixação, por possuírem muitos furos e rasgos foram cortadas em máquinas de corte CNC à jato d'água. A chapa superior foi cortada plana e dobrada posteriormente.

Os acoplamentos (Figura 99) e os cubos das rodas (Figura 100) foram feitos com bolachas de aço de refugo dos cortes da CNC jato d'água. Essas bolachas foram soldadas em tubos de aço cortados na medida, com uma solda grosseira, que depois foi usinada para atingir a forma final, assim como as bolachas. Os furos para o parafuso prisioneiro foram feitos na furadeira de bancada, e depois a rosca feita no macho do fazedor de rosca.



Figura 99. Acoplamento da coroa maior em destaque.



Figura 100. Cubo da roda.

Os componentes foram montados no laboratório, depois de adquiridos os parafusos, porcas e arruelas, mostrados na Figura 101 e 102.



Figura 101. Arruelas de pressão e arruelas comuns para fixação dos parafusos e porcas.



Figura 102. Parafusos M6 allen usados para fixar os suportes de ABS impressos na chapa de fixação.

Para a montagem da corrente foi usada uma chave extratora saca pino, Figura 103, e emendas com pinos para fechá-las.



Figura 103. Chave extratora saca pino usada para montar a corrente.

Para tensionar as correntes a regulagem foi dada nos mancais, cujos furos para fixação tem um jogo suficiente para permitir tal ajuste, como podemos ver na Figura 104.

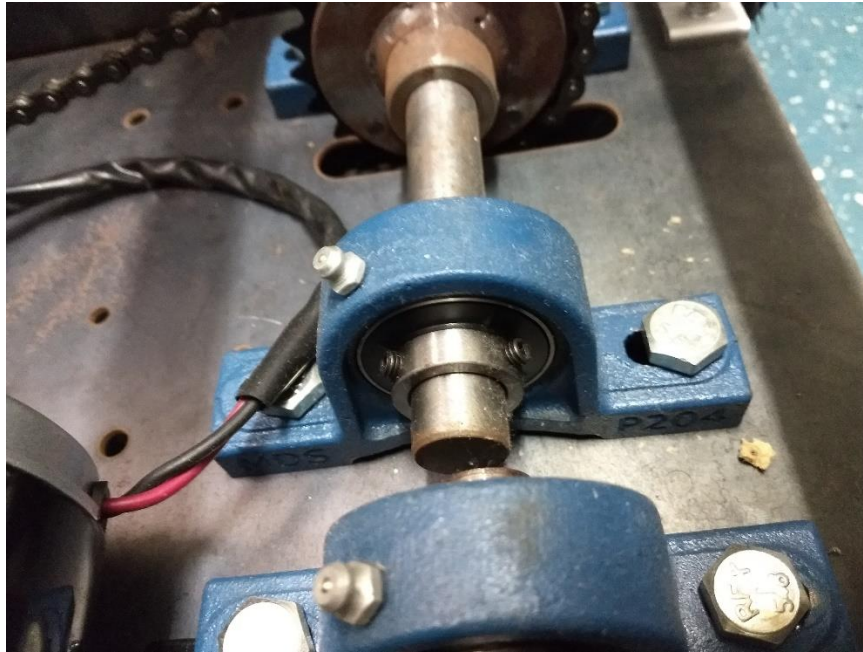


Figura 104. Montagem dos mancais em detalhe, mostrando o rasgo de fixação com espaço para ajuste.

A corrente foi montagem passando por baixo da chapa de fixação (assoalho) do robô, para ficar entre esta e a chapa de fundo (Figura 105).



Figura 105. Montagem da corrente passando por baixo da chapa.

O resultado obtido foi a seguinte montagem, que podemos nas Figuras 106, 107, 108 e 109, abertas e fechadas, respectivamente.



Figura 106. Montagem do robô sem as chapas de fechamento.

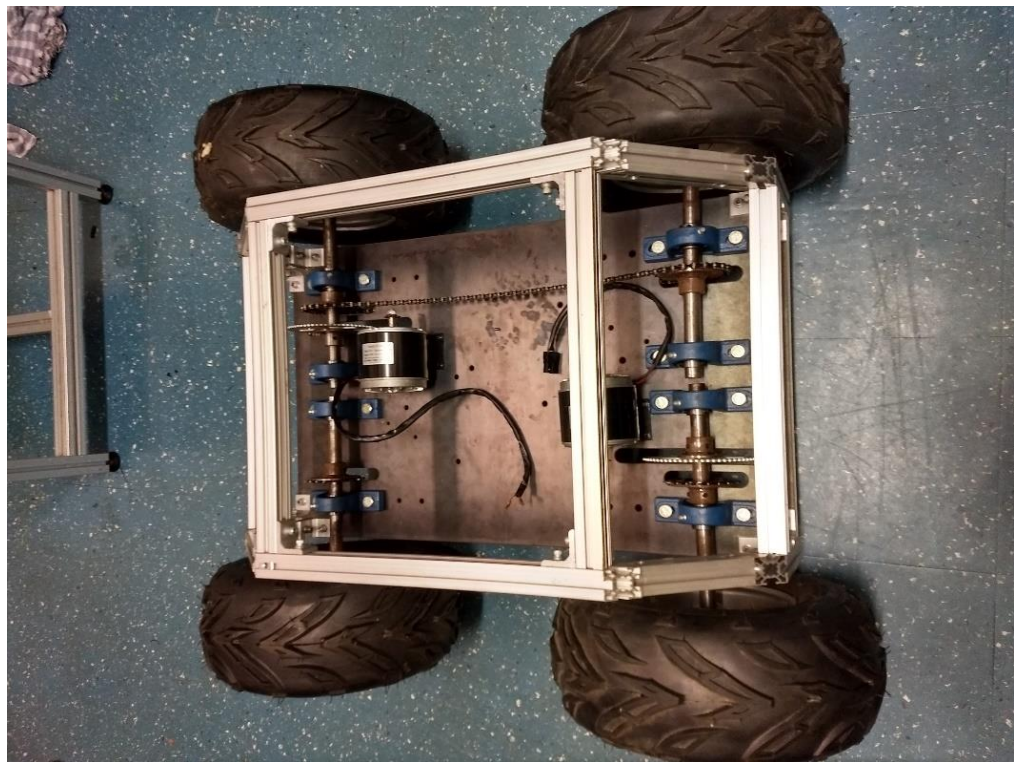


Figura 107. Montagem do robô sem as chapas de fechamento, vista superior.



Figura 108. Montagem do robô com as chapas de fechamento.

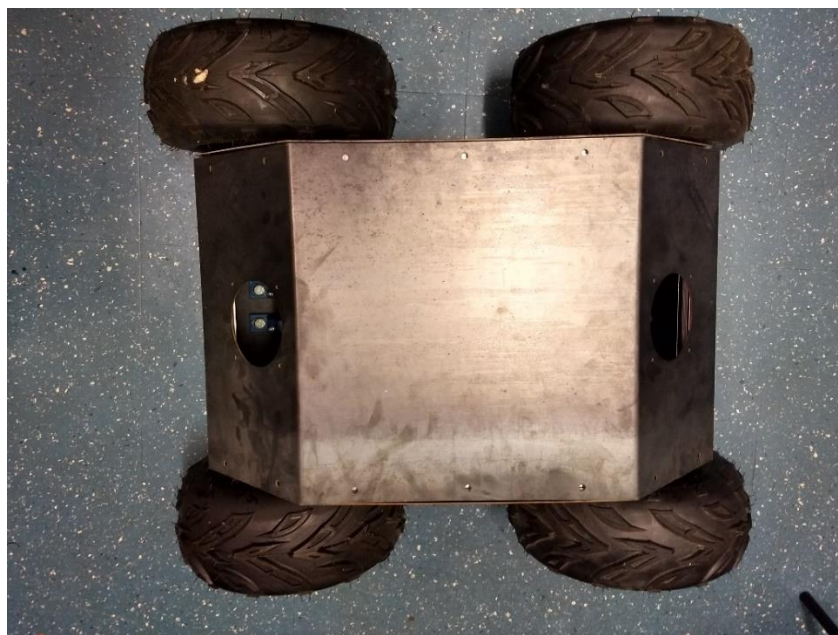


Figura 109. Montagem do robô com as chapas de fechamento, vista superior.

3.4. ANÁLISES POR ELEMENTOS FINITOS

A fim de simular o comportamento do robô e tirar algumas métricas do projeto, foram feitas algumas análises da estrutura, aplicando o método dos elementos finitos, usando o software Ansys®. Foram feitas sete análises, sendo três análises modais, a saber, na gaiola, na estrutura fechada sem as rodas, e na estrutura fechada com as rodas, e quatro análises estáticas,

a saber, três análises de torsão, onde se considerou uma força estática equivalente como esforço de torsão, simulando uma lombada ou buraco, também nas três condições citadas acima (gaiola, estrutura fechada sem rodas e estrutura fechada com rodas), e uma análise de impacto frontal no chassi, considerando uma força estática equivalente. Também será apresentado um cenário de análise com resultados incoerentes, a fim de mostrar a necessidade de critérios e conhecimento na execução de análises por elementos finitos para se evitar erros de projeto.

3.4.1. MODELO DE GEOMETRIA USADO

A princípio a geometria usada como modelo nas análises foi o desenho feito no CAD, original, da qual se removeram os componentes interiores mantendo apenas a estrutura. Porém, ainda sim, por se tratar de uma montagem e por possuir muitos detalhes a análise se mostrou muito pesada para a execução na máquina disponível. A primeira simulação não se conclui por isto, e foram feitas várias simplificações no modelo, removendo furações, detalhes e peças pequenas, como as cantoneiras da gaiola, dando origem ao primeiro modelo simplificado, que pode ser visto na Figura 110.

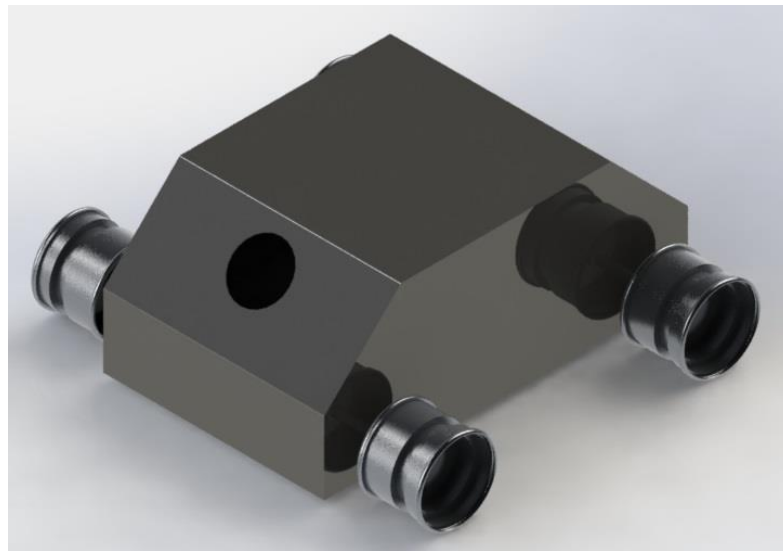


Figura 110. Primeiro modelo simplificado da estrutura.

Como podemos ver, neste modelo além de se remover os furos menores e detalhes, os pneus também foram removidos para efeito de simplificação, uma vez que determinar seu amortecimento seria um desafio. Além disso, o pior cenário na análise de torsão seria aquele em que não há amortecimento, e assim toda a carga é transferida para a estrutura.

Neste modelo foi realizada a primeira análise modal, que levou cerca de 25 horas para ser executada. Este tempo elevado se deveu principalmente ao fato de se tratar de uma montagem, e neste caso os contatos entre as peças integrantes acabam tendo uma grande complexidade na modelagem matemática. A simulação retornou resultados não condizentes com a realidade, uma vez que algumas dentre as primeiras frequências naturais, no caso as de corpo livre, apresentaram resultados diferentes de zero. Além disso houve uma deformação estranha na chapa de fundo, de mais de um metro, que pode ser atribuída ao fato de que a malha nesta peça possuía apenas um elemento em mais de uma direção, o que pode levar a erros no algoritmo e foi um erro alertado pelo próprio Ansys®. Os resultados obtidos nesta análise podem ser vistos na seção 7 anexo III.

Para corrigir o problema ocorrido, a malha deveria ser refinada, porém isto impossibilitaria sua execução, dadas as limitações da máquina usada, uma vez que a simulação na malha mais grosseira quase não finalizou. Foi feito então um segundo modelo simplificado, onde a geometria era em peça única, o que simplifica bastante a análise, e vários detalhes foram simplificados também, como os furos de alívio e as canaletas dos perfis estruturais que foram removidos, os rasgos nas chapas, etc.

Este modelo simplificado foi feito em três versões, a fim de que se pudesse comparar os resultados das análises de cada versão. As versões foram apenas a gaiola (Figura 111), a estrutura fechada sem as rodas (Figura 112), e a estrutura fechada com as rodas (Figura 113). A estrutura fechada contempla a gaiola, as chapas de fechamento, a chapa de fixação, os mancais e os eixos. Os demais componentes também foram removidos.

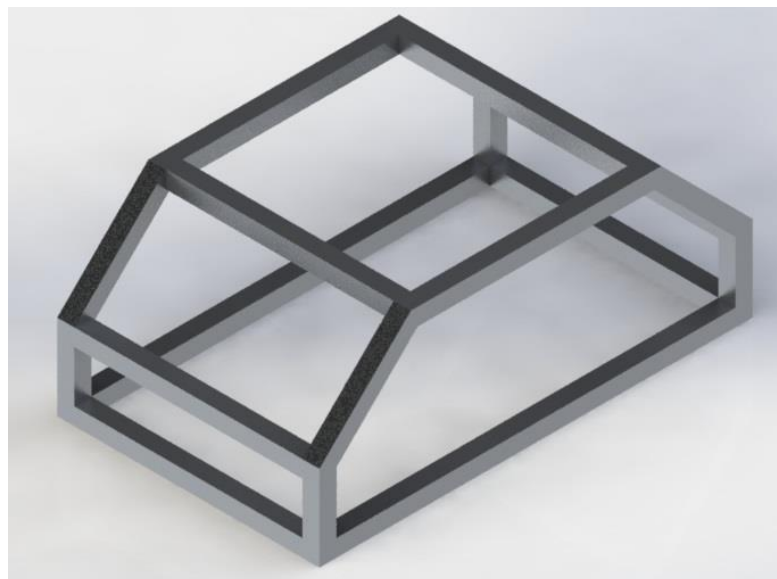


Figura 111. Modelo simplificado da gaiola.

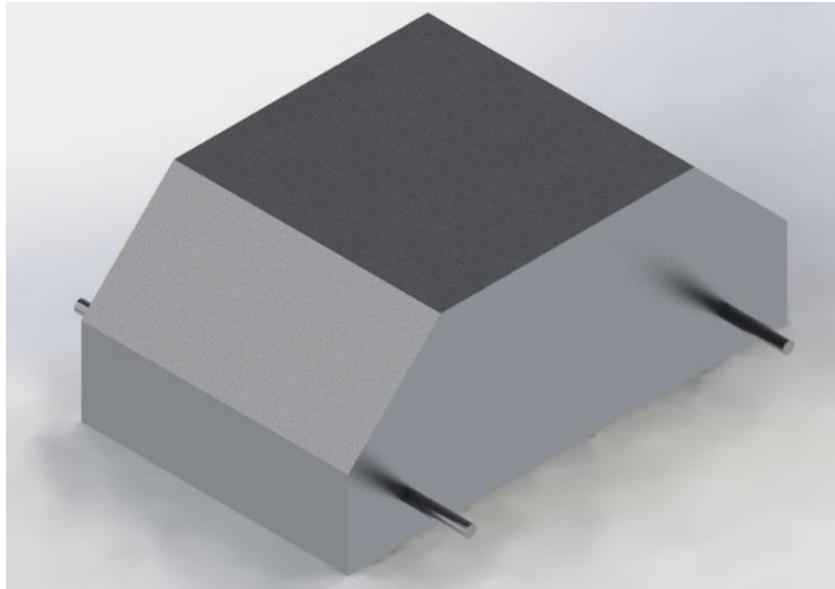


Figura 112. Modelo simplificado da estrutura fechada sem rodas.

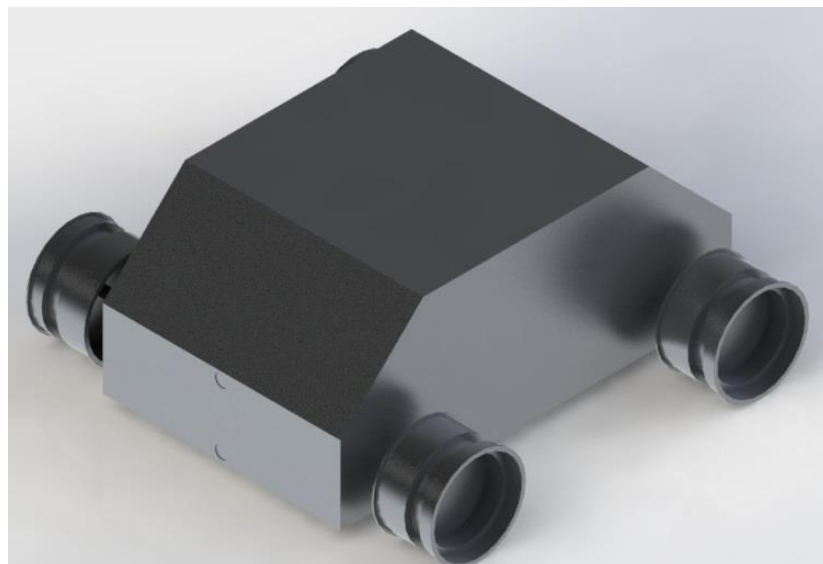


Figura 113. Modelo simplificado da estrutura fechada final (com rodas).

Estes foram os modelos de geometria usados para todas as análises mostradas a seguir. Estes modelos possuem uma série de simplificações, que podem ter impacto nos resultados, como o fato de que as uniões são consideradas perfeitas (já que se tratam de peças únicas), os detalhes foram omitidos, os componentes internos também foram omitidos (bem como os pneus), e por fim, um único material foi especificado para todo o modelo, já que se trata de uma peça única, o que não condiz com a realidade. Neste caso o material escolhido foi o alumínio, por ser predominante na montagem da estrutura, e também como consideração de segurança, uma vez que por ser menos resistente que o aço, se o modelo apresentar comportamento aceitável com o alumínio, o de aço terá resultados melhores.

3.4.2. ANÁLISES ESTÁTICAS

Os casos mais críticos em termos estruturais que o robô irá enfrentar em sua operação são os impactos dinâmicos. Existem dois cenários claros onde isso ocorrerá, um onde o robô passa por uma descontinuidade no solo e, portanto, sofre um impacto vertical, e outro onde ele colide com algum obstáculo enquanto se move a certa velocidade, sofrendo um impacto horizontal. Nos dois casos trata-se de um carregamento dinâmico, geralmente difícil de se modelar. Uma alternativa que a literatura propõe é o uso de cargas estáticas equivalentes na análise. Segundo a literatura, em alguns cenários é possível com algumas simplificações, a determinação do chamado fator dinâmico, ou seja, um fator pela qual multiplicamos um carregamento que estará sendo aplicado dinamicamente, a fim de entender que magnitude ele deveria ter caso fosse aplicado estaticamente, gerando o mesmo efeito de deformação. Assim podemos encontrar uma carga estática que irá gerar o mesmo efeito de deformação do carregamento dinâmico, e usando essa carga, executar a análise como se fosse estática. Seguindo esse princípio pode-se realizar as análises a seguir segundo os conceitos e metodologias de análises estáticas, obtendo os resultados equivalentes ao caso dinâmico.

O primeiro cenário abordado foi o cenário do impacto vertical. Neste cenário considerou-se que a descontinuidade do solo geraria um impacto apenas vertical, e, conforme literatura, como a aplicação é súbita, podemos considerar o fator dinâmico como sendo 2, ou seja, o esforço carregado estaticamente deverá ser o dobro para produzir mesmo efeito. Neste caso o carregamento será o próprio peso da estrutura, cuja massa é igual à 63,25 kg, portanto o esforço será de 63,25 kgf ou 620,22 N. Como o fator dinâmico é 2, a carga estática equivalente será de 1240,44 N. Considerando ainda o critério de falha, e usando um fator de segurança de 1,5, teremos um carregamento de 1864 N, arredondando para cima. Este será o carregamento a ser usado nas análises de impacto vertical. A fim de entender o comportamento da estrutura, este cenário foi levado às piores circunstâncias, ou seja, uma extremidade da estrutura foi engastada, e na outra o esforço foi aplicado nas duas pontas, com sentidos opostos, formando um binário.

Este carregamento foi feito na estrutura da gaiola inicialmente, e, assim como a análise modal, mostrou a fragilidade desta sem os travamentos. A gaiola torceu-se apresentado deformação máxima de 4,5 mm nas extremidades onde o binário foi aplicado. Quanto às tensões de Von Mises, também usadas aqui, o maior valor resultou em 155,71 Mpa, o que dependendo do alumínio, poderá ultrapassar o limite de escoamento. Porém essa tensão foi bastante

localizada, especialmente próximo aos engastes, o que poderia gerar deformações locais plásticas expressivas, mas não a falha da estrutura.

No cenário da estrutura fechada sem as rodas, o carregamento e engastes foram feitos nos mesmos lugares da gaiola, a fim de se verificar o efeito do travamento. Este demonstrou ser muito expressivo, uma vez que a deformação máxima neste caso foi quase 72 vezes menor, sendo de $62,95 \mu\text{m}$. As tensões foram cerca de 11 vezes menores, atingindo valor máximo de $13,72 \text{ Mpa}$, bem abaixo do limite de escoamento do alumínio e muito mais do aço. Pode-se ver também como elas foram maiores nos travamentos que nas vigas. Essa simulação mostrou bem o efeito de enrijecimento da estrutura conseguido com as chapas, além de que para esta carga, que a estrutura está bem dimensionada e atende os critérios de integridade e rigidez.

Para o cenário da estrutura fechada com rodas, o carregamento foi posicionado de forma diferente, sendo feito nas rodas, a fim de ser mais condizente com a realidade. Portanto as rodas de trás foram engastadas na base, e nas rodas da frente foi aplicado o binário. Como seria de se esperar, a deformação foi maior neste caso, já que o esforço recaiu sobre o eixo, quando no cenário anterior se distribuiu por toda a estrutura. Neste caso tivemos uma deformação máxima de $3,71 \text{ mm}$, que ocorreu nas próprias rodas, e as tensões de Von Mises atingiram $174,84 \text{ Mpa}$, concentradas nos eixos na região do engaste destes. Os valores de tensão sendo abaixo do limite de escoamento do aço implicam que a estrutura não falharia, porém, a deformação é suficiente para causar desalinhamento das rodas, sendo um cenário prejudicial ao funcionamento do robô. Discutiremos melhor uma saída para este problema na seção 5.

Por fim, a última análise feita foi a de colisão horizontal, incidindo sobre a estrutura na parte frontal. Para este cenário foram feitas algumas considerações para se obter o valor do carregamento estático equivalente. Primeiramente se considerou que velocidade na colisão seria a máxima do robô, ou seja, $7,3 \text{ m/s}$. Considerou-se também que o impacto levou $0,5 \text{ s}$ para causar a desaceleração total da estrutura, ou seja, a desaceleração média foi de $14,6 \text{ m/s}^2$. Isso implica em uma força de inércia de $923,38 \text{ N}$ (considerando a massa de $63,25 \text{ kg}$). Com esta força de inércia foi feita a simulação inicial, onde se engastou a traseira da estrutura e se aplicou o carregamento em duas áreas na parte frontal, sobre as vigas da gaiola, uma vez que serão as áreas onde o carregamento se concentrará em uma colisão. Com esta carga se encontrou uma deformação máxima de $29,64 \mu\text{m}$. Usando-se esta deformação e a Equação 7, se determinou a carga estática equivalente como sendo de $395,31 \text{ kN}$. Este carregamento foi feito da mesma forma que o anterior, engastando se a parte traseira do robô e aplicando se a carga em duas áreas na parte frontal, sobre as vigas. O resultado obtido foi uma deformação máxima de $12,69$

mm localizada na área de aplicação da força sobre a viga superior da parte frontal e uma tensão máxima de 2,75 GPa, suficiente para a ruptura do material, localizada na mesma região.

Num cenário real, haveria falha localizada na estrutura, inclusive na viga. Portanto este é um cenário prejudicial à estrutura, mostrando que em cenários críticos a estrutura poderá vir a falhar. Discutiremos este problema melhor também na seção 5. Os resultados na íntegra das análises aqui citadas poderão ser melhor vistos na seção 7 anexo II deste trabalho.

3.4.3. ANÁLISES MODAIS

Foram feitas análises modais nos modelos a fim de se determinar as frequências naturais destes e seu comportamento nessas frequências. Portanto os resultados de interesse escolhidos foram a deformação total do modelo e a tensão equivalente de Von Mises, por ser um dos critérios de falha mais usados nas teorias de resistência dos materiais. Foi também requisitado o resultado das tensões máximas principais, para se analisar sua relação com as tensões de Von Mises. Nestas análises o modelo foi submetido às excitações livre, ou seja, sem engastes ou pré-cargas. As análises foram feitas para se obter as dez primeiras frequências naturais, sendo as seis primeiras as frequências de corpo livre, a fim de se verificar a validade do modelo pelo algoritmo, e as outras quatro sendo as de interesse. Como o robô será excitado usualmente em baixas frequências, o comportamento da estrutura além das 4 frequências iniciais diferentes de zero não é de interesse neste trabalho, a priori.

A malha usada foi a malha padrão gerado pelo próprio Ansys®, com as características de refino da malha nas configurações intermediárias, a fim de não pesar a solução da simulação. As características físicas do alumínio foram obtidas através da biblioteca de materiais própria do software também.

A análise da gaiola retornou, como esperado, as frequências de corpo livre próximas à zero (como o algoritmo resolve as equações usando cálculo numérico os resultados são aproximados). As quatro primeiras frequências não-zero foram 110,95 Hz, 162,33 Hz, 196,58 Hz e 204,61 Hz, onde as deformações para estas frequências se mostraram elevadas, além de a deformação se estender por áreas grandes da estrutura. Essas deformações vieram acompanhadas de tensões também elevadas. Estes valores de tensão superam bastante o limite de escoamento das ligas de alumínio e inclusive do aço, e, portanto, numa situação real significaria a falha do material. Eles são em parte consequência da baixa rigidez da estrutura, uma vez que seus formatos quadrados sem travamento acabam cedendo facilmente. Esses resultados nos mostram que o uso do travamento na gaiola foi indispensável.

Na análise da estrutura fechada (sem rodas) com o aumento da rigidez se esperou uma melhora nos valores. O panorama se mostrou bastante diferente da anterior, a começar pelas frequências não-zero encontradas, a saber, 517,85 Hz, 566,24 Hz, 570,22 Hz e 628,41 Hz, respectivamente, bem superiores às anteriores e superiores às possíveis frequências que podem aparecer na estrutura em operação. Ao contrário do caso anterior, as deformações aqui foram bastante localizadas, e seus valores também altos podem ser atribuídos a espessuras das chapas (2 mm), e significam claramente, no modelo real, também a falha da estrutura, ainda mais se aliadas aos valores de tensão equivalente. Todavia altos de tensão e deformação são esperados para esse fenômeno.

Na análise da estrutura com rodas pode-se observar que a presença de massas localizadas na ponta de um eixo em balanço, como de se esperar, abaixaram drasticamente as primeiras frequências, a saber, 120,27 Hz, 120,67 Hz, 120,92 Hz e 123,82 Hz, respectivamente. Em todos os modos de vibração as rodas foram as partes do robô que sofreram as maiores deformações, e as tensões ficaram localizadas nos eixos, próximos ao seu engaste na estrutura. Neste cenário os eixos certamente falhariam também, na região de engaste.

Em todos os casos, apesar de os efeitos serem catastróficos, as frequências nas quais eles ocorrem estão fora do espectro de operação da máquina, já que em situações normais, uma frequência de excitação de 10 Hz poderia ser considerada um valor exagerado. Além disso, em operação normal o ambiente não teria energia suficiente para uma excitação dessa ordem. Assim esta estrutura não estará sujeita ao efeito de ressonância. Como é difícil de se levantar as informações referentes a isto, estas análises tem por efeito maior, neste caso, a determinação das frequências naturais e dos modos de vibração.

Os resultados na íntegra das análises aqui citadas poderão ser melhor vistos na seção 7 anexo III deste trabalho.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto se mostrou mais desafiador do que o imaginado inicialmente, e nem todos os objetivos pensados foram executados. Todavia, ele constou como um importante avanço para projetos futuros, que serão melhor detalhados na próxima seção.

Alguns desafios foram encontrados no decorrer do trabalho, como a fabricação dos acoplamentos. Apesar de ter sido fácil obter os materiais necessários, a mão de obra para o serviço acabou sendo o desafio. O parceiro inicialmente definido que executaria a fabricação dessas e outras peças, repentinamente saiu do ramo, e foi necessário se buscar outro parceiro. A primeira fabricação resultou em peças de qualidade muito ruim, com soldas malfeitas que se quebraram no momento da usinagem. Portanto elas tiveram que ser descartadas. A segunda tentativa resultou em peças melhores, que acabaram por se tornar as definitivas.

Outro desafio encontrado foi na montagem dos mancais. Para evitar o uso de tensionadores, considerou-se o a fixação regulável dos mancais como alternativa para se regular a tensão das correntes. Contudo, na prática isso não se mostrou uma boa opção, visto que o alinhamento se tornou difícil de conseguir. O problema se agravou devido ao fato de que dois dos eixos possuem dois conjuntos com corrente, sendo necessário regular suas distâncias de forma a atender à ambas as correntes.

Um grande problema ocorrido foi que as referências de requisitos e premissas também se perdeu depois que o projeto de doutorado que serviu de fornecedor dos requisitos principais deste trabalho deixou de existir, caso da fixação das câmeras, que, como não definidas no projeto referido, não puderam ser consideradas aqui.

As análises por elementos finitos se mostraram um ponto interessante do projeto, onde muito conhecimento teve que ser desenvolvido, a fim de se aplicar neste. Apesar disso, a falta de capacidade da máquina usada para executar as análises implicou em algumas simplificações, como já mencionado anteriormente, que podem ter afastado o resultado delas da realidade. Embora as simulações sirvam de referências para o comportamento real do robô, é difícil mensurar os efeitos das simplificações feitas, mesmo que a priori sejam pequenos. Portanto será sugerido na próxima seção um aperfeiçoamento deste trabalho feito, a fim de aumentar a confiabilidade no modelo.

A principal contribuição deste trabalho foi o projeto e construção da estrutura do robô móvel, que irá servir de plataforma para outros trabalhos. Este também teve o importante papel de levantar o tema da robótica móvel, mostrando oportunidades que esta área pode oferecer, tanto no âmbito acadêmico, na forma de maiores pesquisas para aprimoramento das técnicas

existentes, quanto no âmbito comercial, onde o projeto em questão mostrou potencial para a geração de negócios em diversas aplicações. Entre essas aplicações destacamos seu uso em agricultura de precisão, onde, como pensado inicialmente, podendo ser usado a fim de colher dados da cultura cafeeira para a detecção de problemas em nível precoce, além de criar base de dados para mais estudos na área. Ele também poderia ser usado em outras culturas como o café, onde a região de interesse da planta encontra-se em seu corpo mais do que no topo, e, portanto, o uso de drones pode perder qualidade nesse sentido.

Outras aplicações também se mostram potencialmente interessantes para uma solução como a deste trabalho, sendo o caso de inspeções em geral, à nível do solo, como em espaços fechados, onde outras tecnologias móveis (especialmente aéreas) tem mais dificuldades de se efetivarem, transporte de cargas em geral, e até mesmo exploração de ambientes mais inóspitos. Para tais aplicações, modificações precisam ser feitas, mas este projeto já constitui uma base na qual outros podem avançar.

A finalização de alguns pontos restantes e melhorias pensadas serão agora detalhadas na seção 5, de Projetos Futuros.

5. PROJETOS FUTUROS

Aqui trataremos das etapas não concluídas neste trabalho e também de melhorias sugeridas para implementação na estrutura já feita.

- Finalização da compra de componentes e montagem: alguns componentes especificados do robô não chegaram a ser adquiridos, como é o caso das baterias. Além disso, nem tudo foi montado no protótipo, como as peças impressas em 3D, que não chegaram a ser fabricadas e os *encoders*. O primeiro projeto futuro sugerido trata de finalizar os detalhes faltantes neste.
- Alterações na estrutura para suportar casos críticos: como as simulações mostraram que a estrutura poderá falhar para alguns cenários críticos, uma análise mais aprofundada destes casos é recomendada. Para se ter melhores resultados para as análises estáticas o indicado seria aliá-las com resultados obtidos experimentalmente, medindo-se as deformações oriundas dos impactos analisados. Caso seja necessário, um eixo maior poderá ser dimensionado, visto que ele se mostrou o principal ponto de falha da estrutura, e neste caso os eixos vazados com maior diâmetro externo podem se mostrar uma opção interessante. Além disso, a utilização de uma outra barra metálica instalada na parte frontal da estrutura pode ser uma boa alternativa para aumentar a resistência no impacto frontal, como um para-choque, absorvendo parte da energia destes impactos que a estrutura vier a sofrer. Como a barra inferior da gaiola é muito bem engastada, este para-choques deveria ser fixado nela, podendo ser inclusive de aço.
- Desenvolvimento do sistema eletrônico e controle: um projeto futuro sugerido é o projeto e prototipagem dos *drivers* de controle do motor, bem como especificar ou projetar a eletrônica embarcada e um sistema de controle básico para primeiras missões, ainda operado remotamente. Os *drivers* devem ter uma interface com o controlador, que pode ser um embarcado de alto desempenho, e poderá também ser equipado com sensores IMU, sensores de proximidade, sensores de temperatura, etc. Esses sensores, bem como os *encoders* já instalados, alimentarão o controlador com dados úteis para a operação. Para alimentar esse sistema, uma nova fonte de energia deverá ser especificada, possivelmente uma bateria LiPo, com autonomia no mínimo igual à da tração dos motores.

- Preparação da estrutura para operação em ambientes hostis: outro projeto futuro sugerido trata de tornar a estrutura capaz de operar em condições mais agressivas. Para tal a estrutura precisa ser vedada, como citado outrora, no caso do rasgo abaixo do eixo, a fim de impedir a entrada de contaminantes do meio, e na junção do eixo com as chapas laterais deve se usar alguma vedação que permita o giro do eixo, talvez o uso de rolamentos acoplados nesta possa ser uma solução. A estrutura também deve ser pintada a fim de protegê-la da corrosão.
- Projeto de sistema de ventilação forçada: para a ventilação forçada, a furação para os coolers já está feita, mas eles devem ser especificados e instalados. Além disso deverão ser especificados filtros de ar, a fim de impedir que poeira, água e demais contaminantes entrem pela ventilação. Para aumentar a eficácia da ventilação poderão ser projetados dutos que irão levar o fluxo gerado pelos coolers até os componentes que mais necessitam de refrigeração, evitando a dispersão. Outra estratégia que pode ser analisado é o uso das pastilhas de Peltier, que podem ser usadas na troca de calor com a parte externa.
- Projeto de melhorias na transmissão e mancais: outro caso é o de desenvolver estratégias para facilitar o alinhamento dos eixos das rodas, através do posicionamento correto dos mancais. Como o robô tem tração diferencial, desalinhamentos podem levar a necessidade de uma compensação constante na velocidade, o que poderia gerar desgastes no sistema como um todo e acumular erros ao longo do tempo no seguimento de trajetórias. Para manter o alinhamento, uma possível solução é o uso de trilhos ou suportes para manter os mancais no lugar no momento de montagem. Outro problema é o de tensionar as correntes, o que pode ser resolvido com um projeto de tensionador para evitar que fiquem bambas e corrigir o afrouxamento natural que ocorrerá com o tempo.
- Projeto do robô autônomo: como era o objetivo inicial do projeto que gerou requisitos para este trabalho, desenvolver algoritmos de navegação e comportamento a fim de permitir uma operação autônoma do robô. Para tal poderão ser usadas câmeras, que fornecerão as informações do meio através de estereoscopia, ou então sensores *lidar* girantes, realizando a varredura para a construção do mapa tridimensional. Através deste mapa, o algoritmo poderá construir uma trajetória a fim de cumprir uma dada missão, sem a intervenção de um operador. O comportamento do robô como um todo também pode ser fruto de uma inteligência embarcada, podendo ser usado inclusive em enxames.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- OLIVEIRA, Fernando César Gama de. Contribution to the Development of a Spaceframe Vehicle Structure Using the Finite Element Method and Heuristic Methods of Numerical Optimization. 2007. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007
- BUZINELLI, Didiane Victoria; MALITE, Maximiliano. Dimensionamento de elementos estruturais em alumínio. São Carlos. Dissertação (Mestrado)–Escola de Engenharia de São Carlos–Universidade de São Paulo, 2000.
- PINTO FILHO, Rômulo Rossi et al. Concepção, projeto e otimização de uma estrutura para aplicação em veículo de uso misto. 2004.
- DE PIERI, Edson Roberto. Curso de Robótica Móvel. Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- DE OLIVEIRA, Hélder Filipe Pinto. Análise do desempenho e da dinâmica de robôs omnidireccionais de três e quatro rodas. 2008.
- NORTON, Robert L. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. Porto Alegre: Bookman editora, 2013.
- SHIGLEY, Joseph Edward. Elementos de máquinas. Livros Técnicos e Científicos, 1984.
- SARKIS, Melconian. Elementos de máquinas. São Paulo, Editora Érica, 2000.
- GENEROSO, Daniel João. Elementos de máquinas. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina-Campos de Araranguá, 2009.
- ARAÚJO, R. Desenvolvimento de uma Bicicleta Elétrica. Portugal: Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2012.
- KINGSLEY JR, Charles; UMANS, Stephen D.; FITZGERALD, Arthur E. Máquinas Elétricas- : Com Introdução à Eletrônica de Potência. Bookman, 2006.
- BIM, Edson. Máquinas elétricas e acionamento. Elsevier Brasil, 2015.
- CHASE, Otavio Andre. Projeto e Construção de um Robô Móvel AGV/ROV Não-Holonômico com Habilidade para Navegação Autônoma do Tipo Wall-Following. 2009. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, BRA.
- HATA, Alberto Yukinobu. Mapeamento de ambientes externos utilizando robôs móveis. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- AZEVEDO, Álvaro FM. Método dos elementos finitos. 2011.
- MIRLISENNA, Giuseppe. Método dos elementos finitos: O que é? Disponível em: <<http://www.esss.com.br/blog/2016/01/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso

em: 10 jun 2019.

FURTADO, Daniel Canongia. Análise estrutural de chassi de veículos automotivos. 2014.

BELYAEV, N. M., Strength of Materials, 2a edição, Mir Publishers, Moscou, 1979.

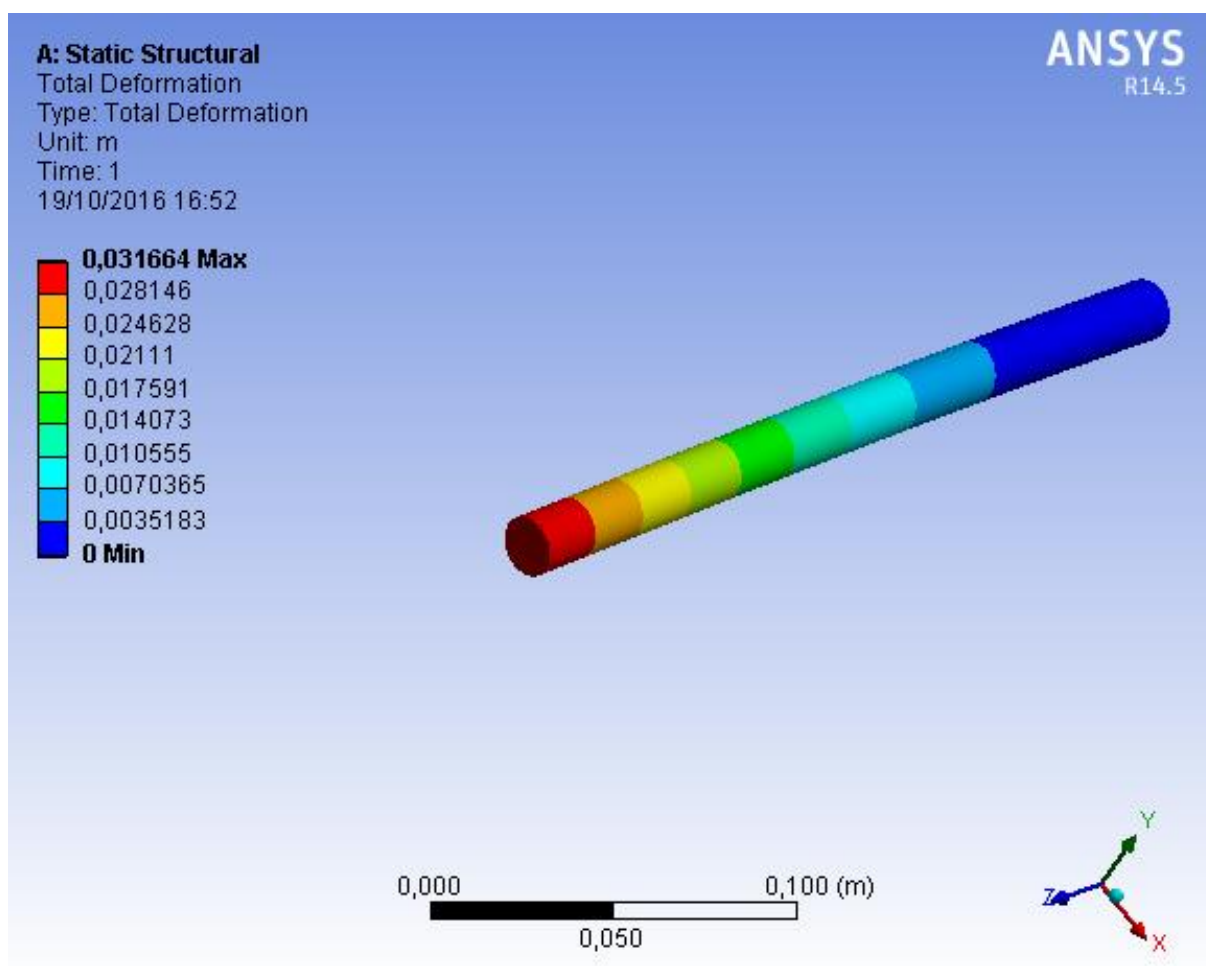
HIGDON e outros, Mecânica dos Materiais, 3a ed., Guanabara Dois S.A., R.J., 1981.

STIOPIN, P., Resistencia de Materiales, Mir Publishers, Moscou, 1968.

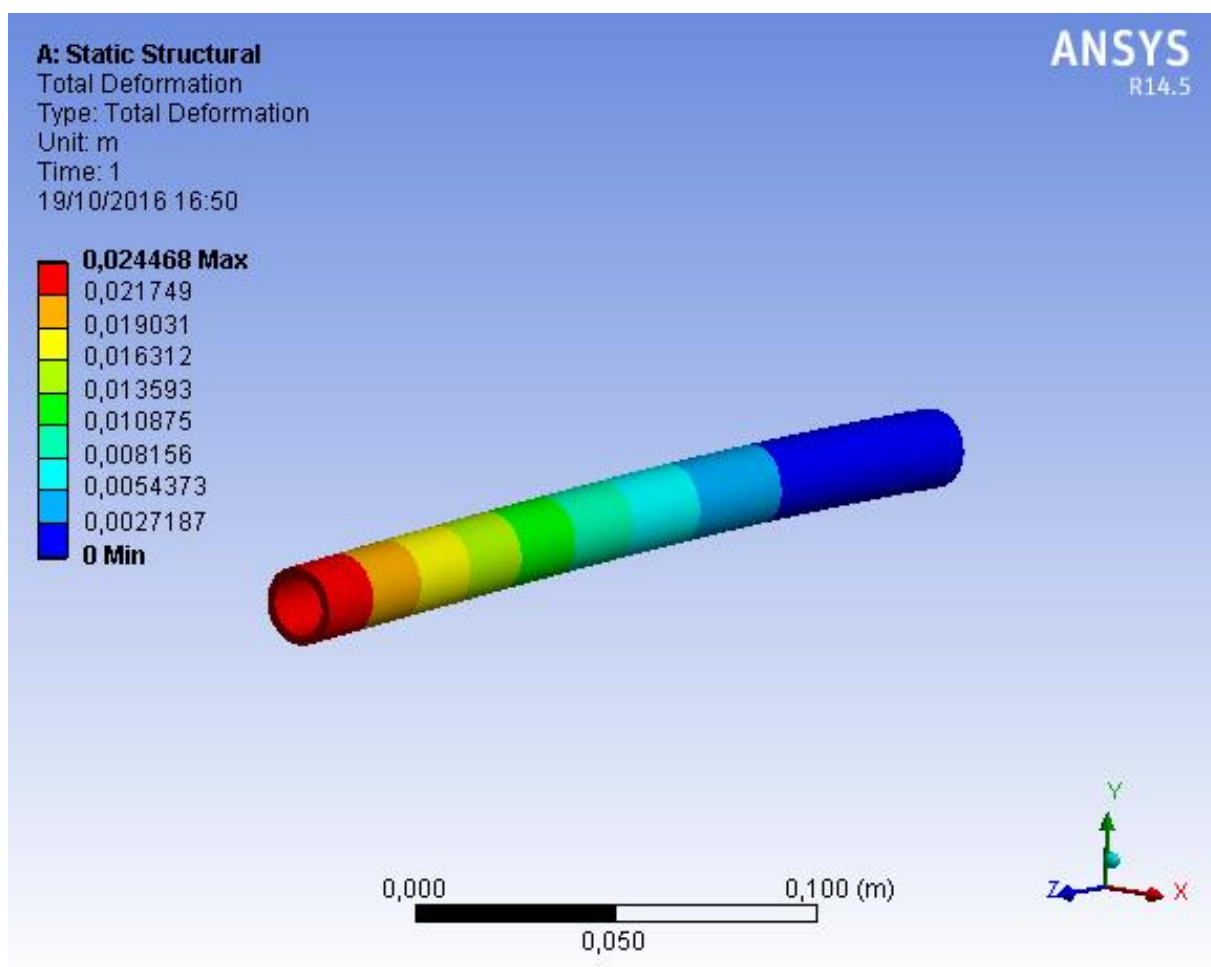
7. APÊNDICE

ANEXO I – RESULTADOS DAS ANÁLISES DOS EIXOS

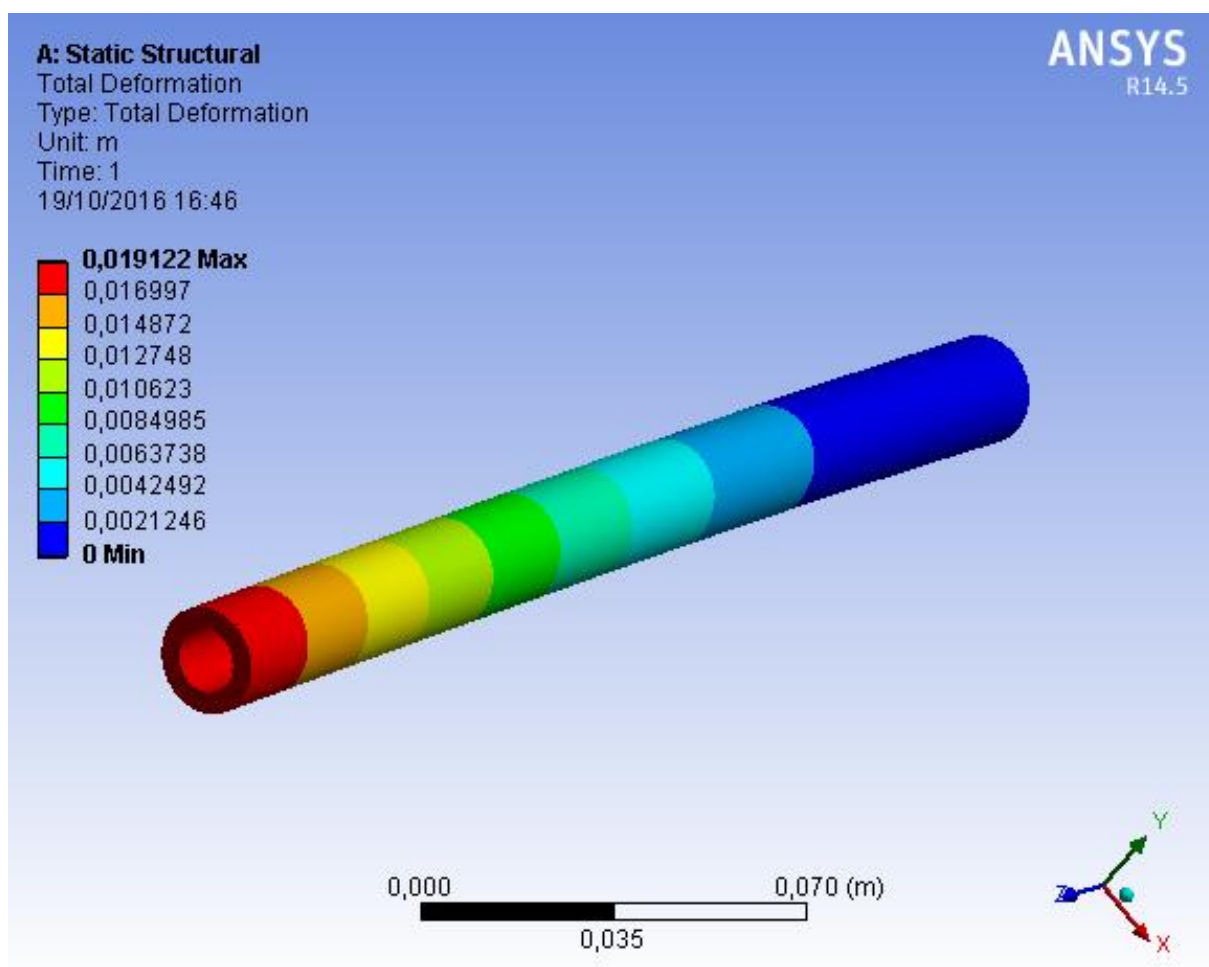
- 1) Gráfico de deformação total para eixo de aço maciço com 17 mm de diâmetro, engastado em uma das extremidades e submetido à carregamento cortante na extremidade livre do eixo, com magnitude de 5000 N (aproximadamente 510 kgf), e carregamento torsor na mesma extremidade com magnitude de 15 N.m (aproximadamente 153 kgf.cm).



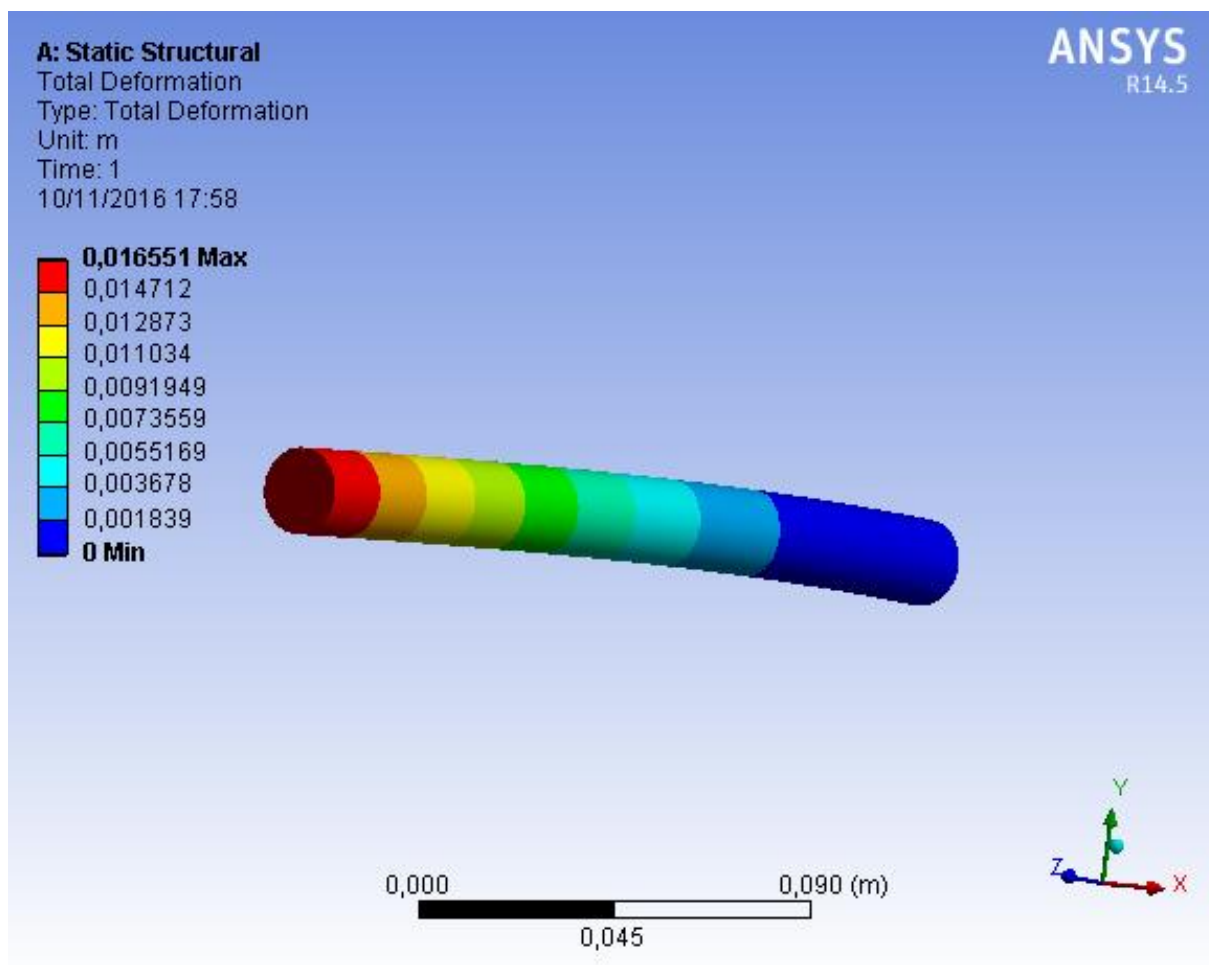
- 2) Gráfico de deformação total para eixo de aço com 20 mm de diâmetro externo e 15 mm de diâmetro interno, engastado em uma das extremidades e submetido à carregamento cortante na extremidade livre do eixo, com magnitude de 5000 N (aproximadamente 510 kgf), e carregamento torsor na mesma extremidade com magnitude de 15 N.m (aproximadamente 153 kgf.cm).



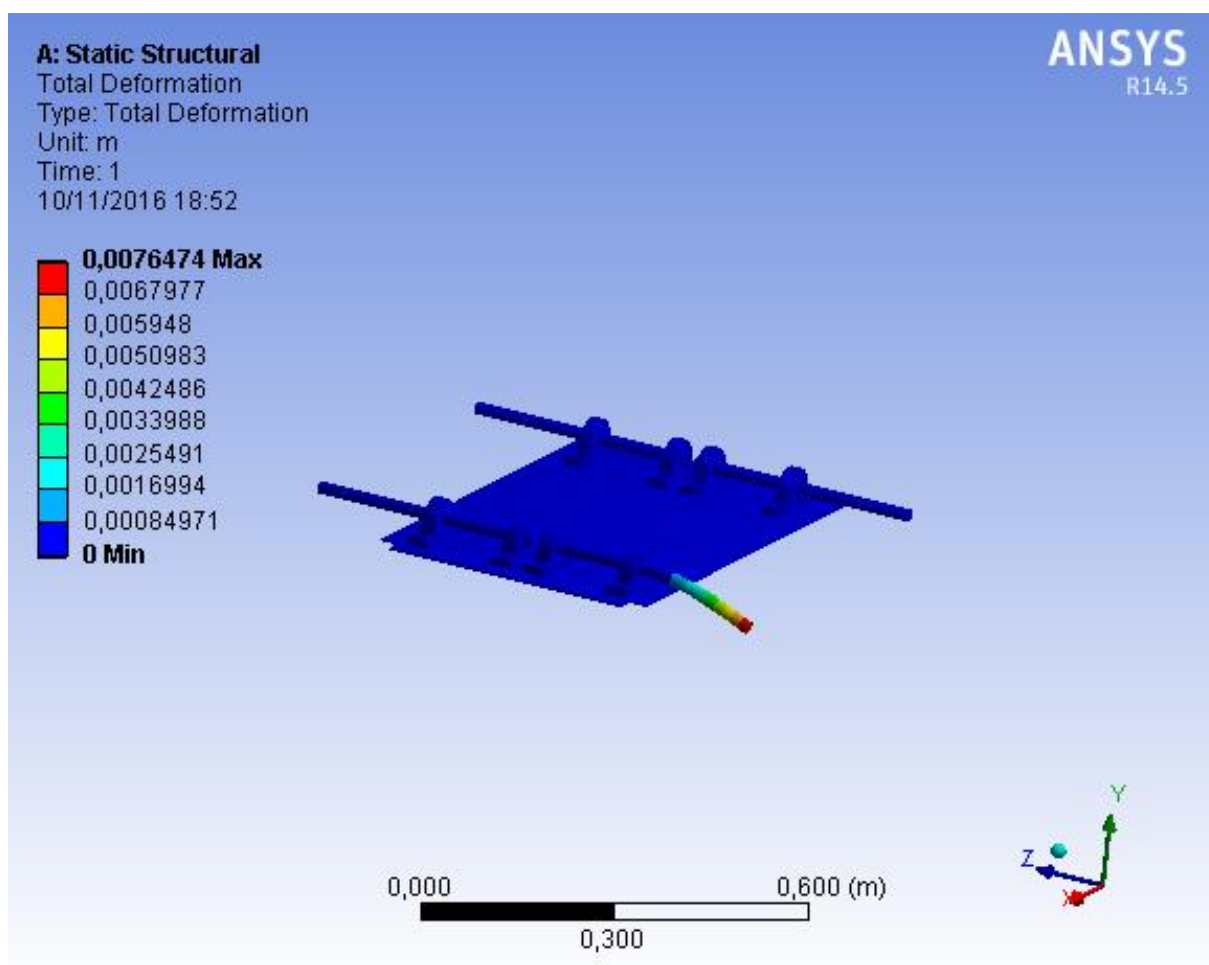
- 3) Gráfico de deformação total para eixo de aço com 20 mm de diâmetro externo e 12 mm de diâmetro interno, engastado em uma das extremidades e submetido à carregamento cortante na extremidade livre do eixo, com magnitude de 5000 N (aproximadamente 510 kgf), e carregamento torsor na mesma extremidade com magnitude de 15 N.m (aproximadamente 153 kgf.cm).



- 4) Gráfico de deformação total para eixo de aço maciço com 20 mm de diâmetro, engastado em uma das extremidades e submetido à carregamento cortante na extremidade livre do eixo, com magnitude de 5000 N (aproximadamente 510 kgf), e carregamento torsor na mesma extremidade com magnitude de 15 N.m (aproximadamente 153 kgf.cm).



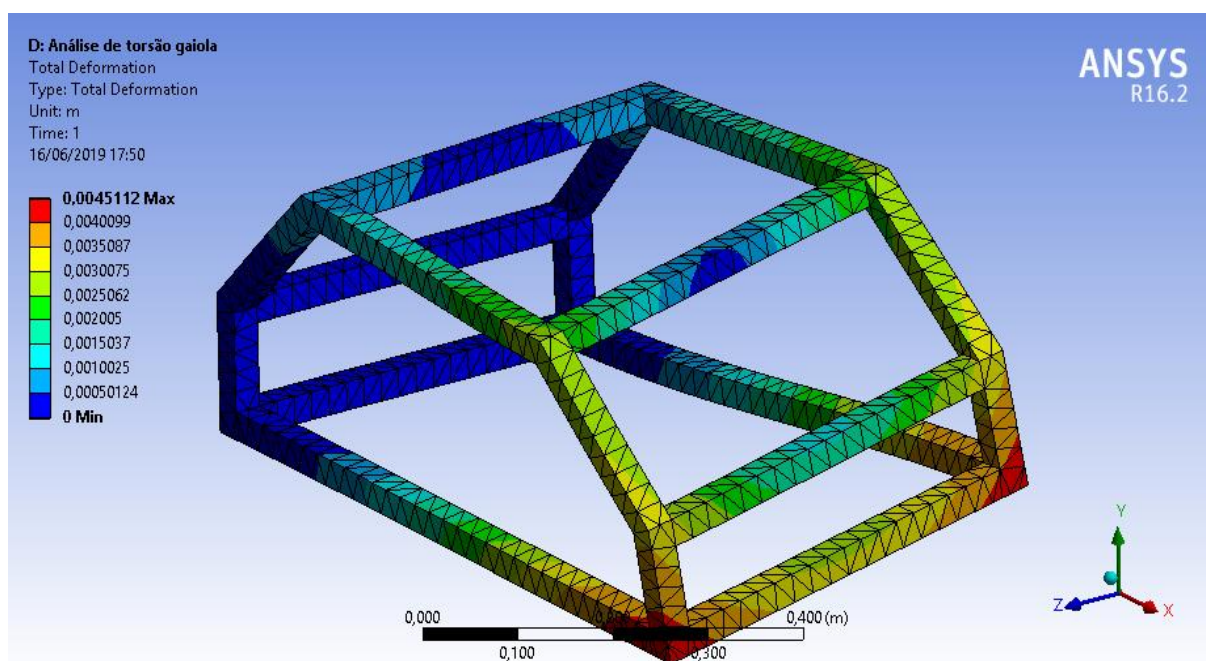
- 5) Gráfico de deformação total para montagem com eixo de aço com 20 mm de diâmetro, mancais e chapa de fixação, com chapa de fixação engastada e a extremidade livre do eixo submetida à carregamento cortante com magnitude de 5000 N (aproximadamente 510 kgf), e carregamento torsor na mesma extremidade com magnitude de 15 N.m (aproximadamente 153 kgf.cm).



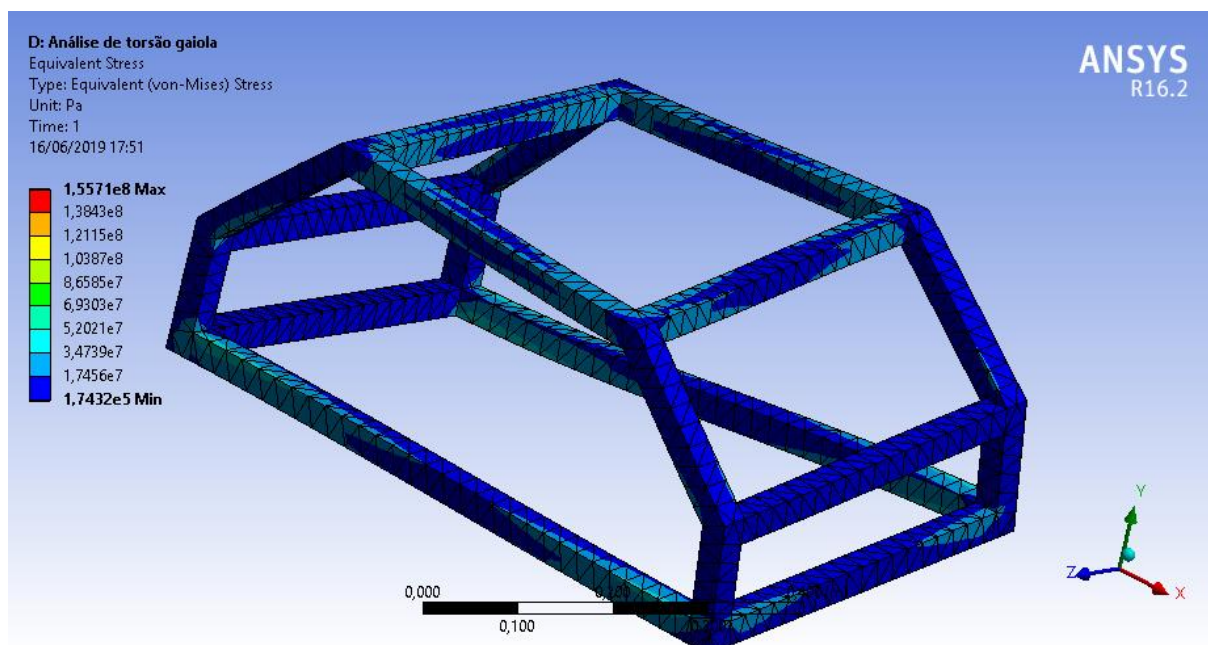
ANEXO II – RESULTADOS DAS ANÁLISES ESTÁTICAS

A. ANÁLISE DE TORSÃO DA GAIOLA

- 1) Gráfico de deformação total para gaiola de alumínio, modelo simplificado, com carregamento de 1864 N aplicado nas duas pontas de uma extremidade, com sentidos opostos em cada ponta, formando um binário, e engaste na outra extremidade.

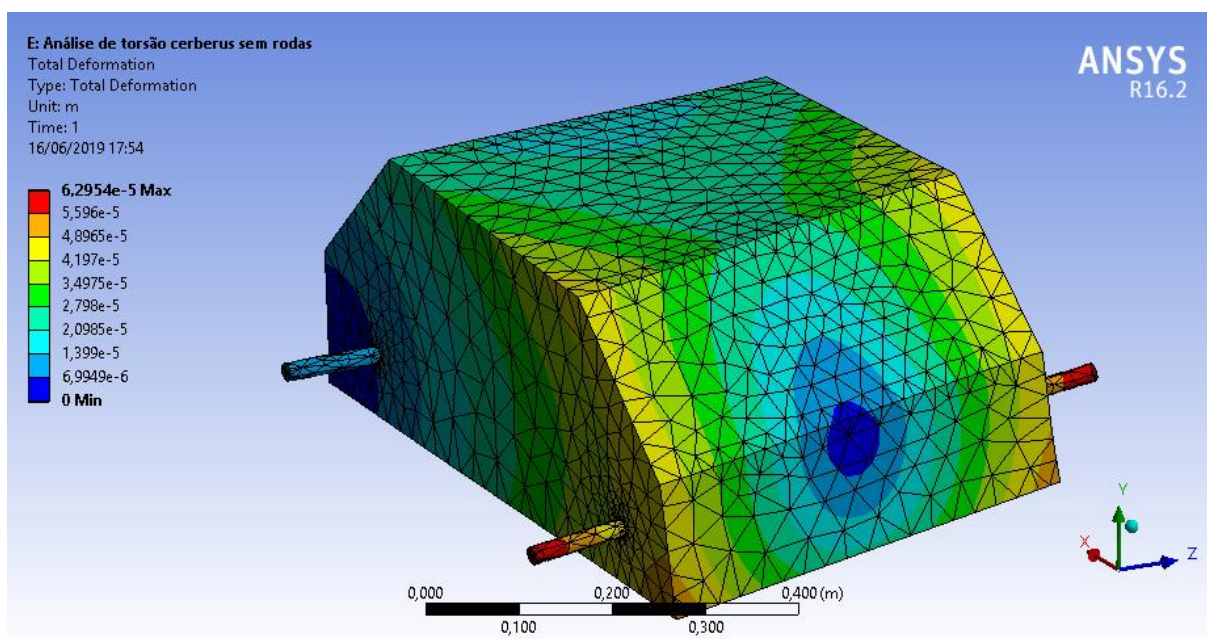


- 2) Gráfico de tensão equivalente de Von Misses para a mesma situação citada no item anterior.

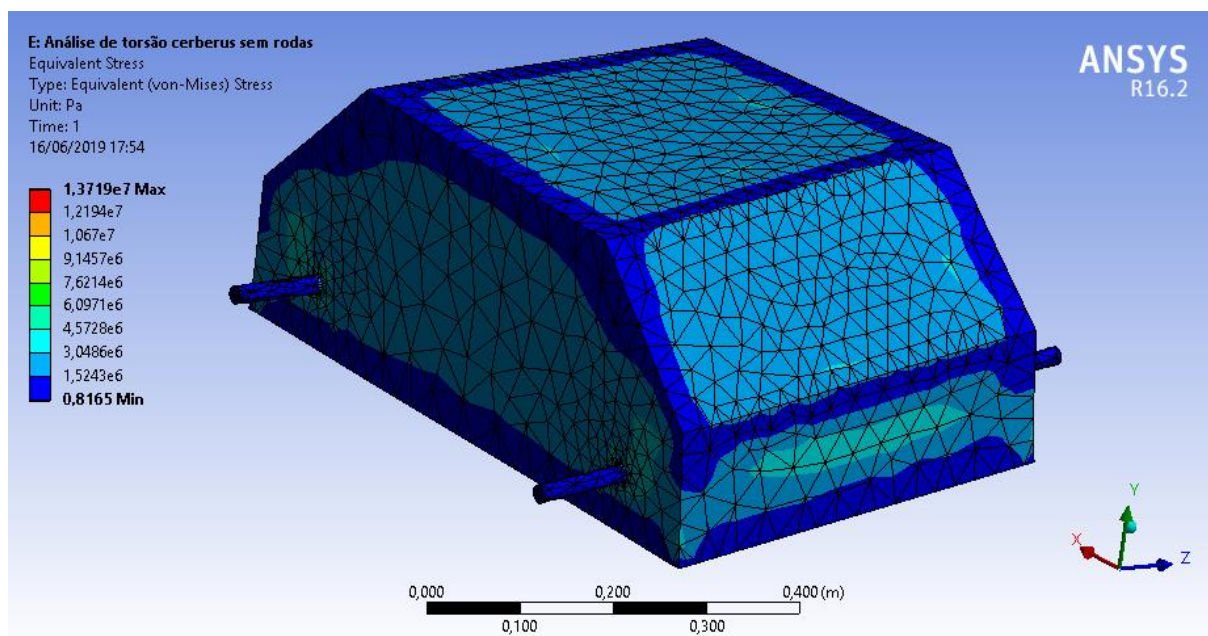


B. ANÁLISE DE TORSÃO DA ESTRUTURA FECHADA SEM AS RODAS

- 1) Gráfico de deformação total para estrutura fechada em alumínio, sem as rodas, modelo simplificado, com carregamento de 1864 N aplicado nas duas pontas de uma extremidade, com sentidos opostos em cada ponta, formando um binário, e engaste na outra extremidade.

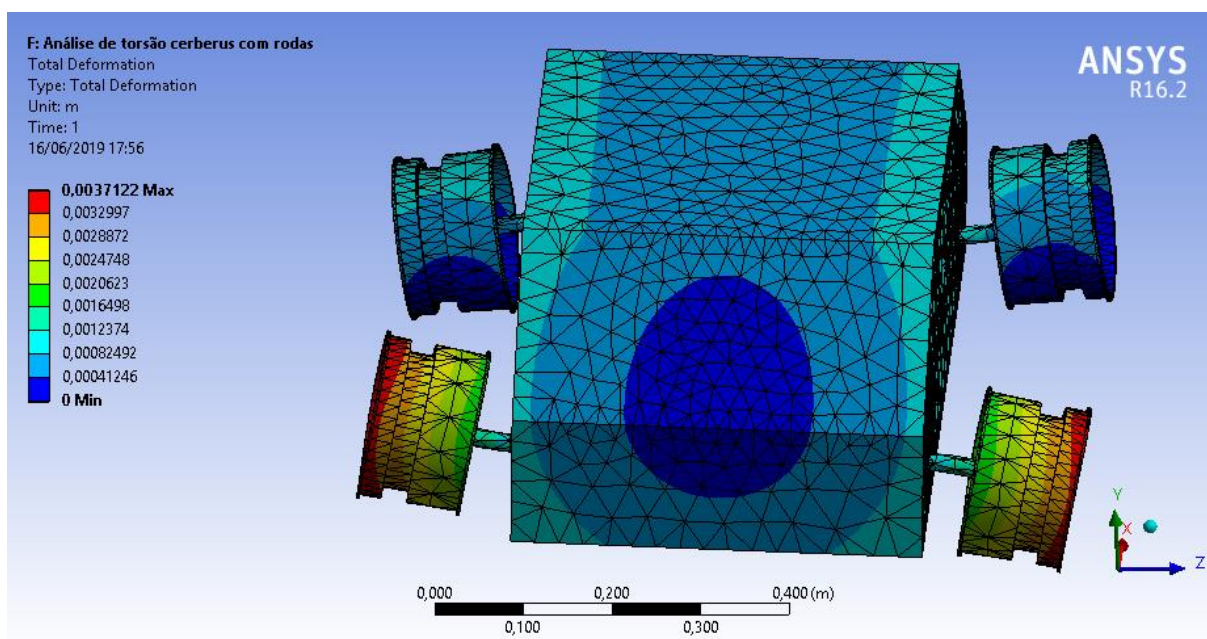


- 2) Gráfico de tensão equivalente de Von Mises para a mesma situação citada no item anterior.

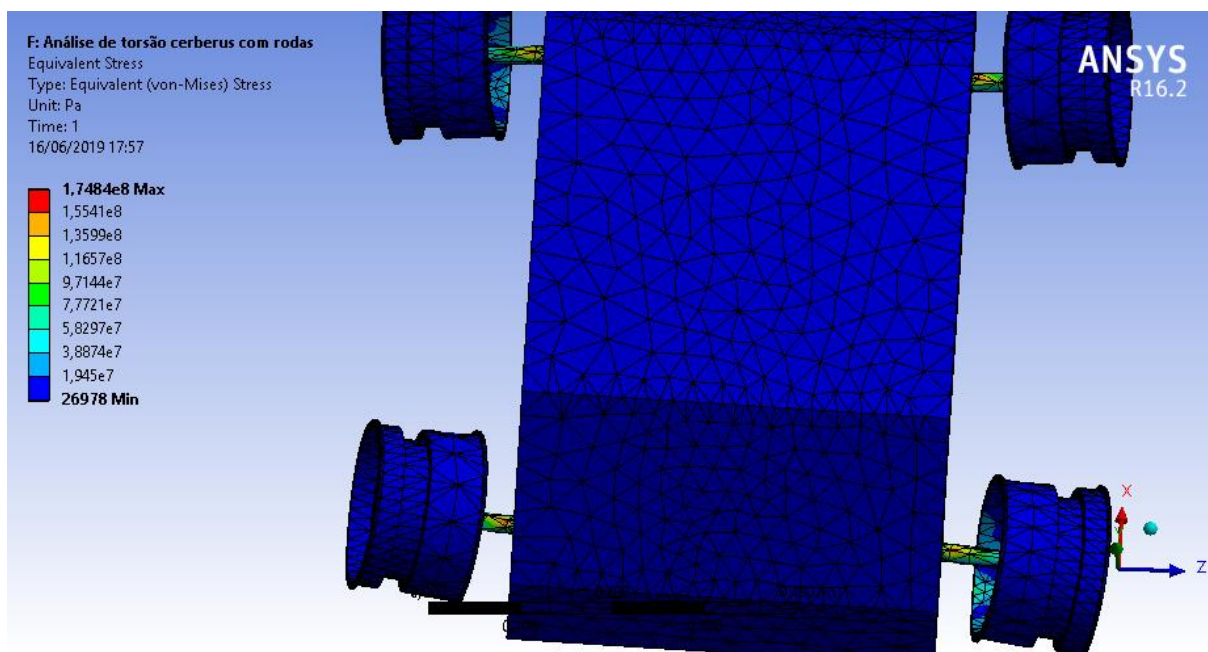


C. ANÁLISE DE TORSÃO DA ESTRUTURA FECHADA COM RODAS

- 1) Gráfico de deformação total para estrutura fechada em alumínio, com rodas, modelo simplificado, com carregamento de 1864 N aplicado na base das rodas de uma extremidade, com sentidos opostos em cada ponta, formando um binário, e engaste na base das rodas da outra extremidade.

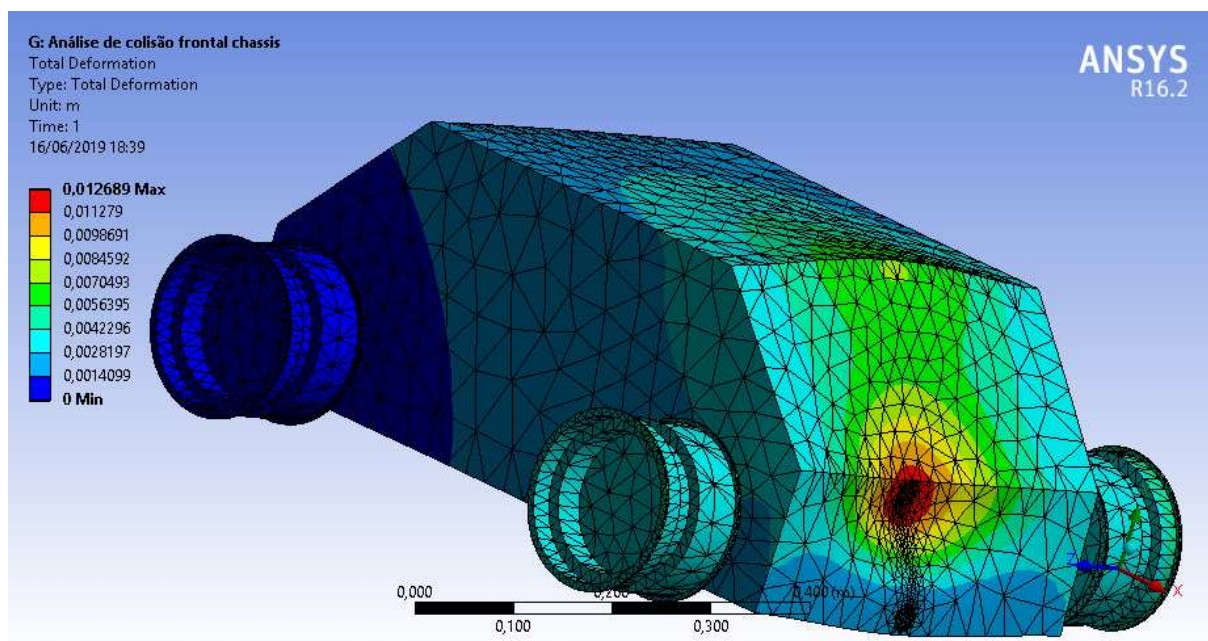


- 2) Gráfico de tensão equivalente de Von Mises para a mesma situação citada no item anterior.

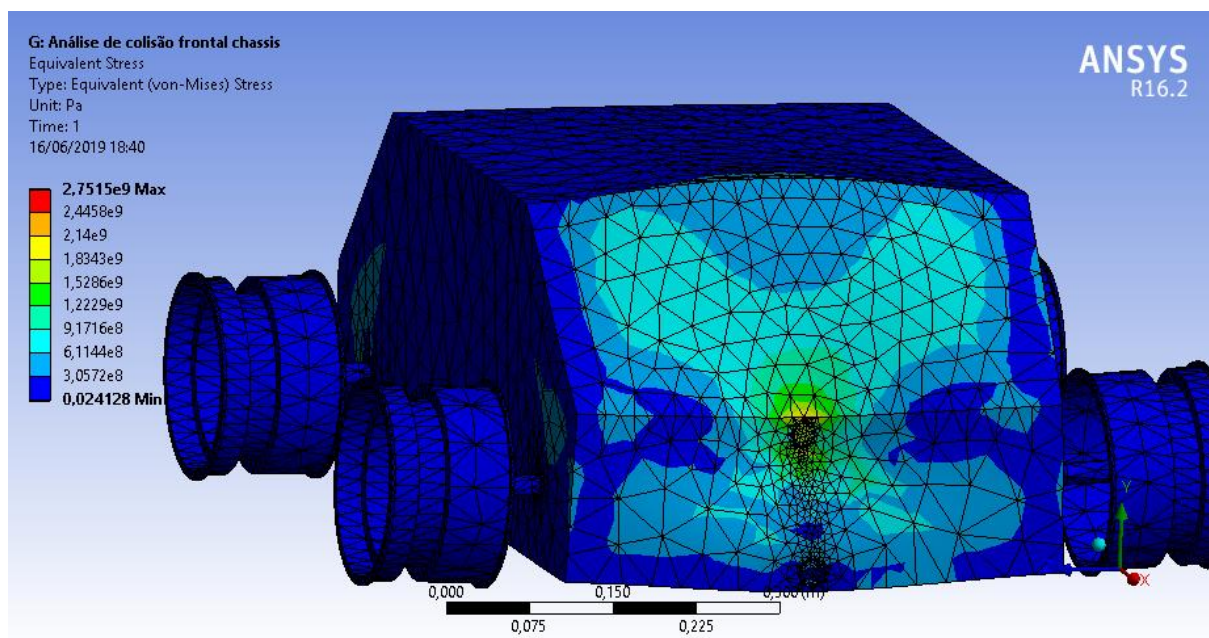


D. ANÁLISE DE COLISÃO FRONTAL

- 1) Gráfico de deformação total para estrutura fechada em alumínio, com rodas, modelo simplificado, com carregamento de 395,31 kN aplicado em duas áreas na parte frontal da estrutura, sobre as vigas internas, e parte traseira engastada como área.



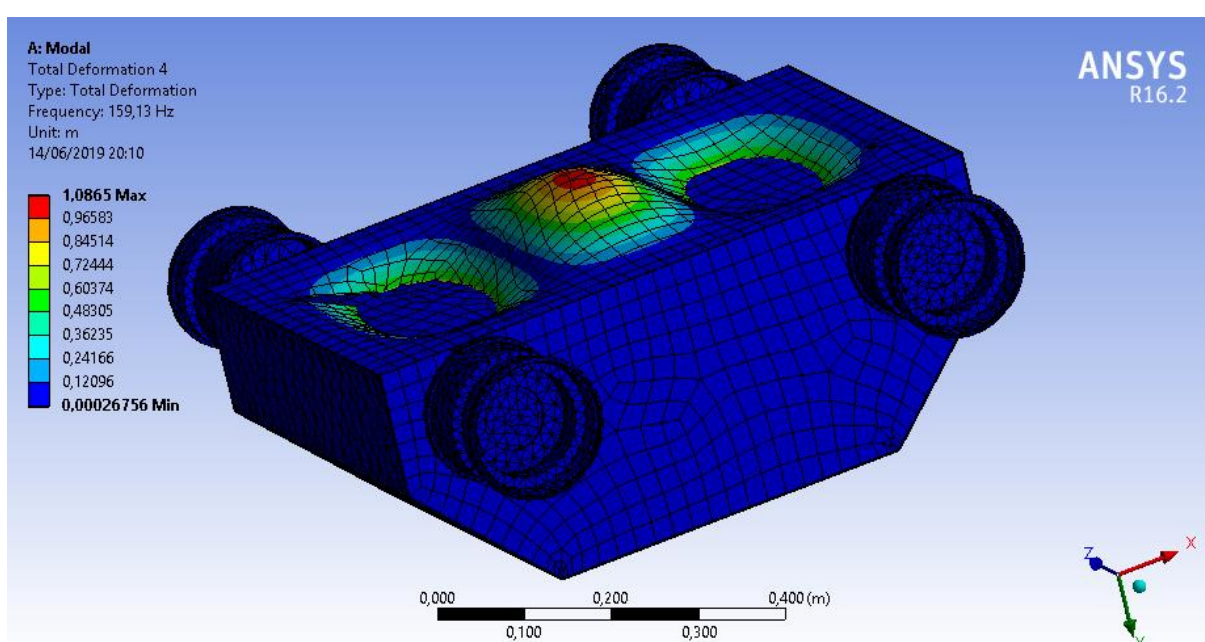
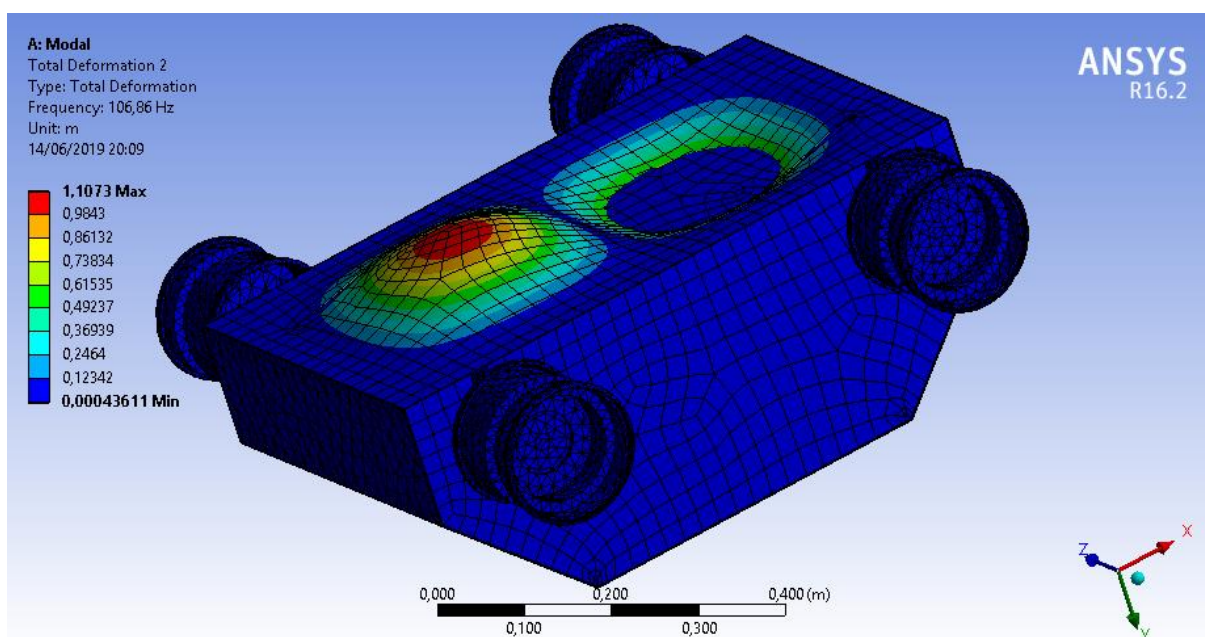
- 2) Gráfico de tensão equivalente de Von Misses para a mesma situação citada no item anterior.



ANEXO III – RESULTADOS DAS ANÁLISES MODAIS

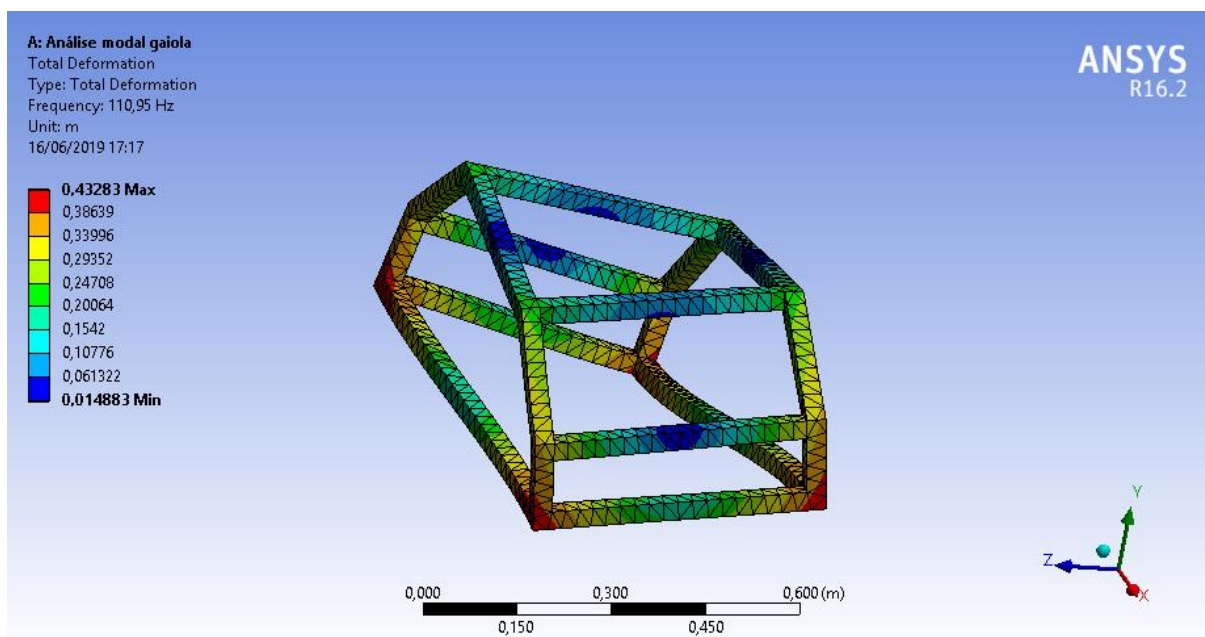
A. ANÁLISE MODAL COM FALHA (PRIMEIRO MODELO SIMPLIFICADO)

- 1) Gráficos de deformação total para estrutura fechada em alumínio, com rodas, primeiro modelo simplificado, onde foi identificado erro na malha, e, portanto, reproduzindo resultados incorretos.

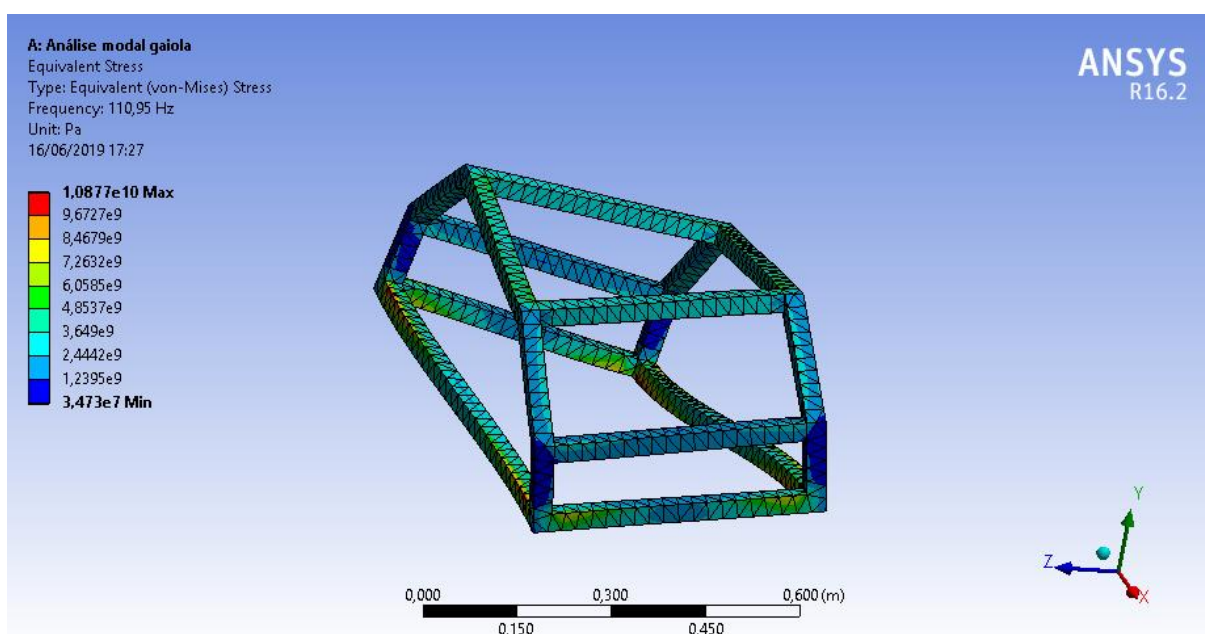


B. ANÁLISE MODAL DA GAIOLA

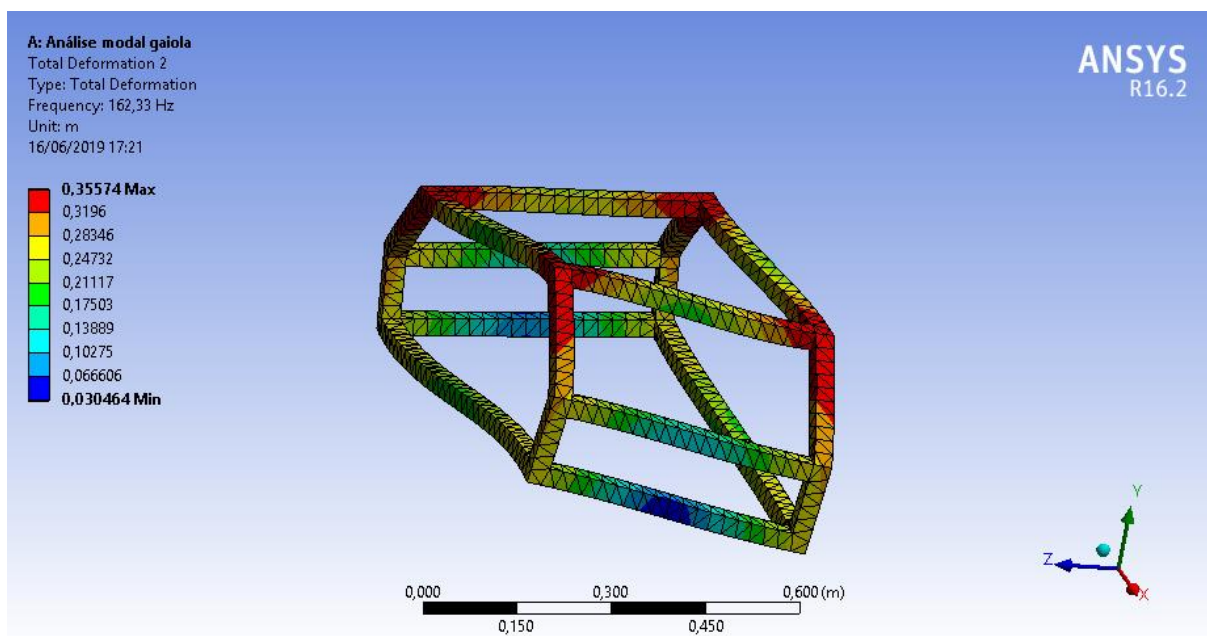
- 1) Gráfico de deformação total para gaiola em alumínio submetida a vibrações livres, comportamento na frequência de 110,95 Hz.



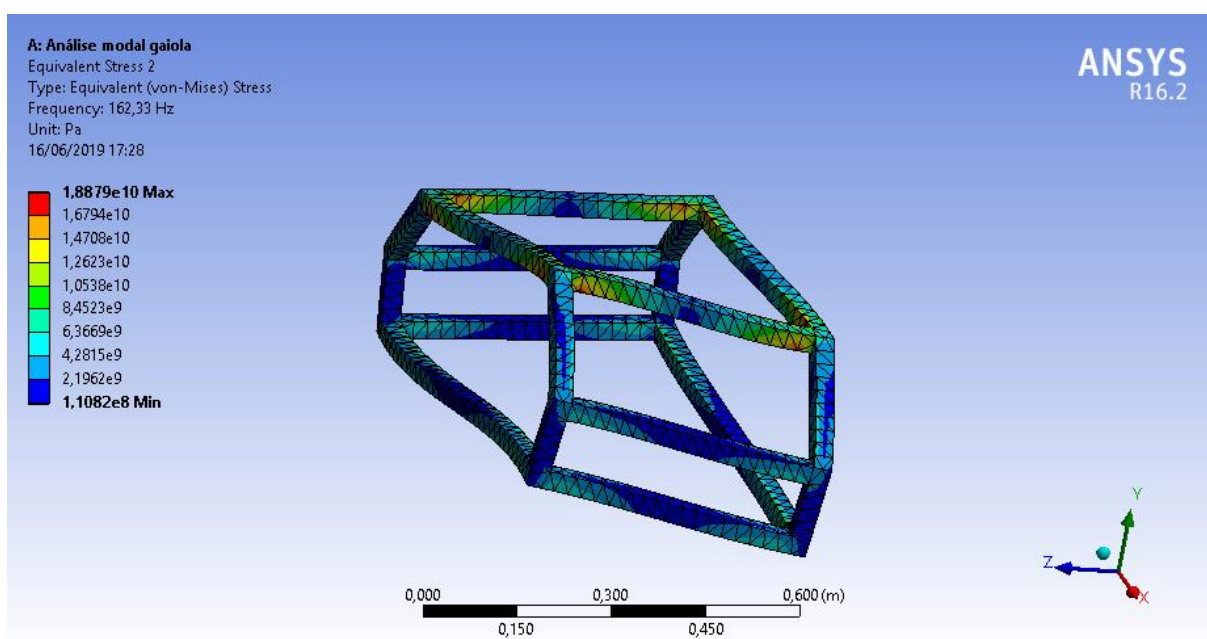
- 2) Gráfico de tensão equivalente de Von Misses para a mesma situação citada no item anterior.



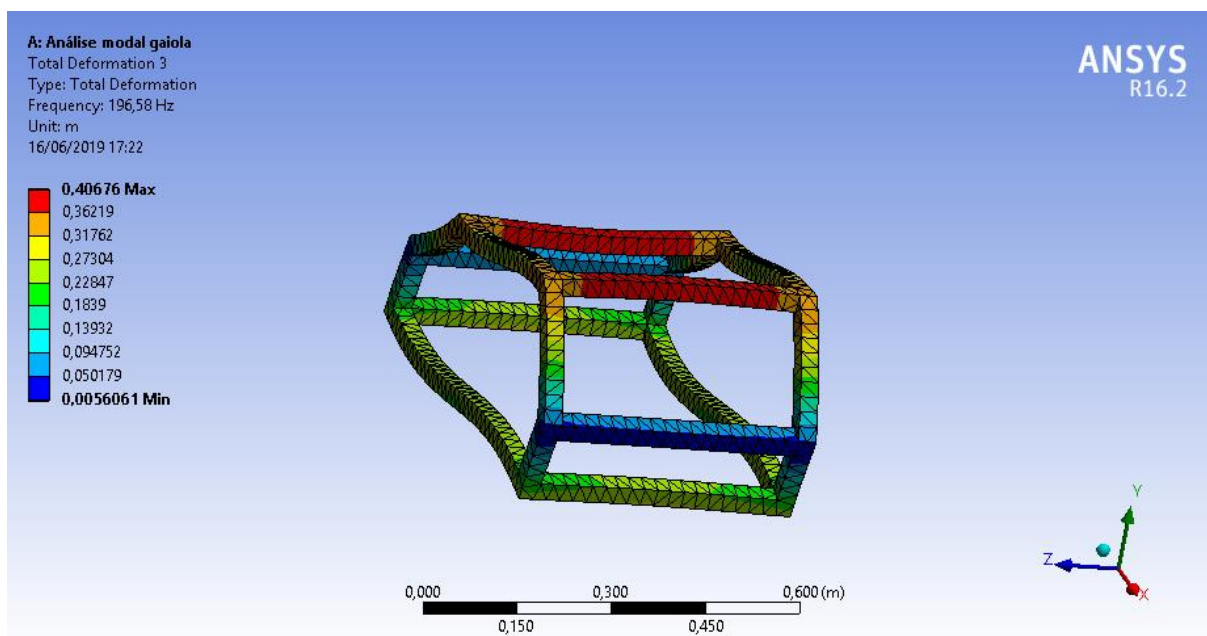
- 3) Gráfico de deformação total para gaiola em alumínio submetida a vibrações livres, comportamento na frequência de 162,33 Hz.



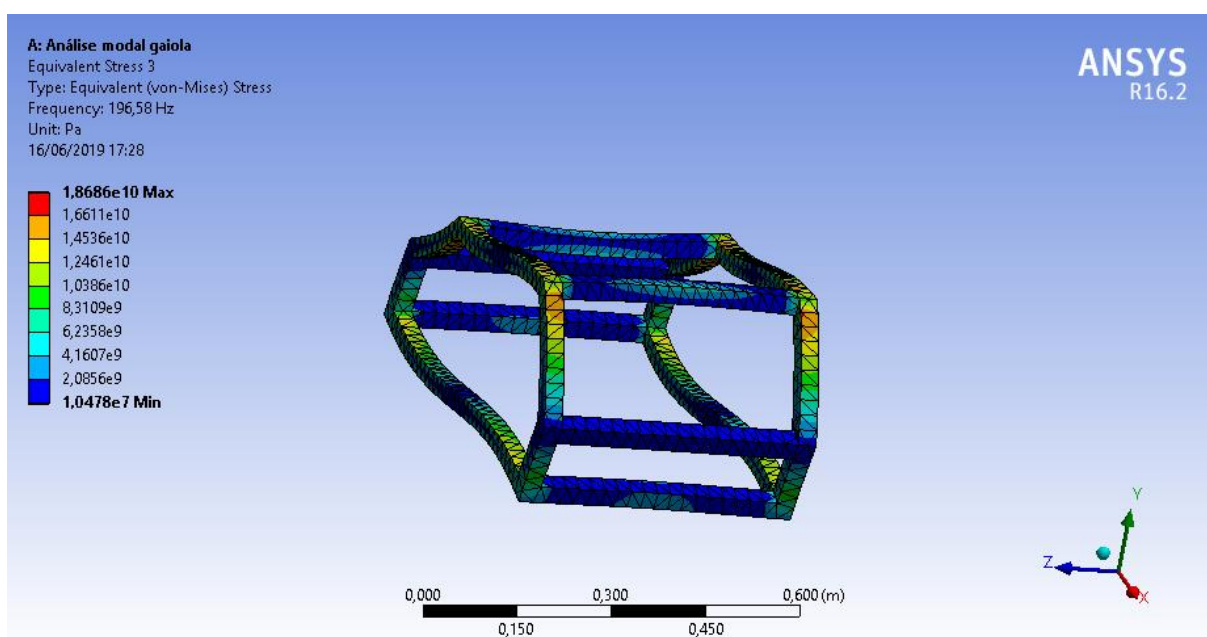
- 4) Gráfico de tensão equivalente de Von Misses para a mesma situação citada no item anterior.



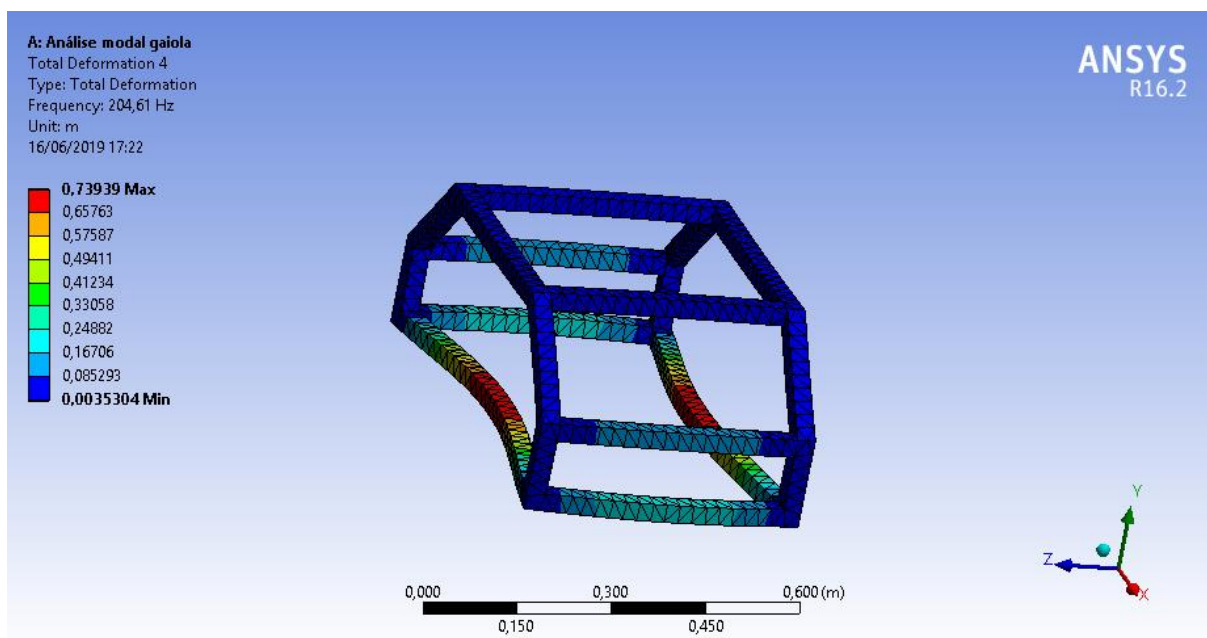
- 5) Gráfico de deformação total para gaiola em alumínio submetida a vibrações livres, comportamento na frequência de 196,58 Hz.



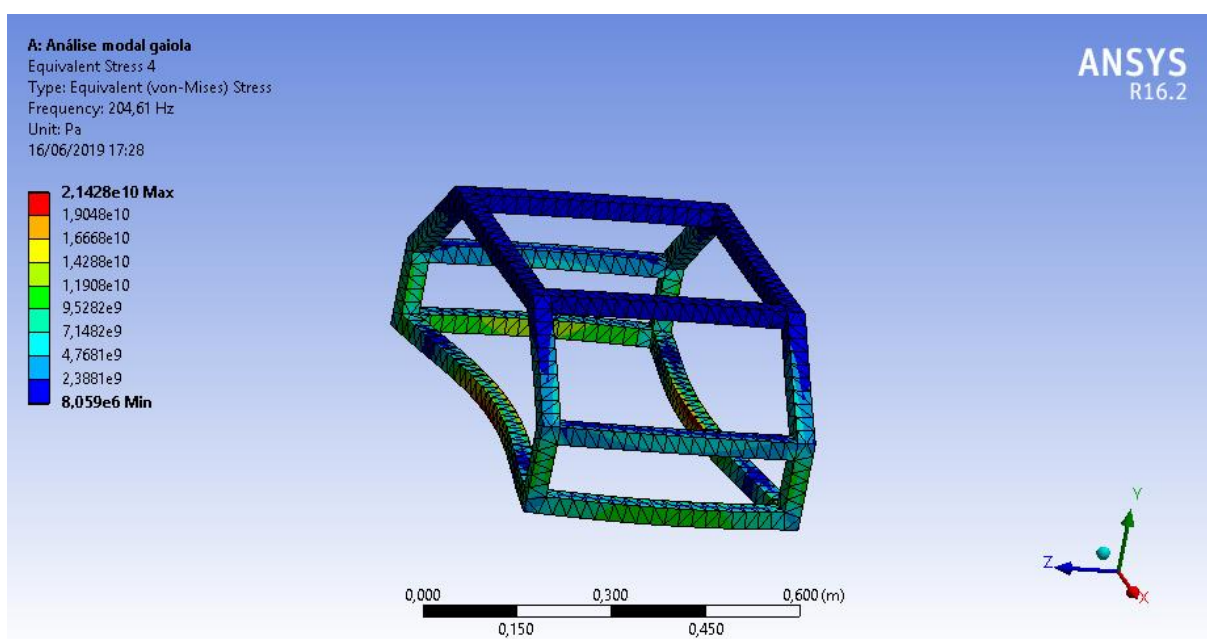
- 6) Gráfico de tensão equivalente de Von Misses para a mesma situação citada no item anterior.



- 7) Gráfico de deformação total para gaiola em alumínio submetida a vibrações livres, comportamento na frequência de 204,61 Hz.

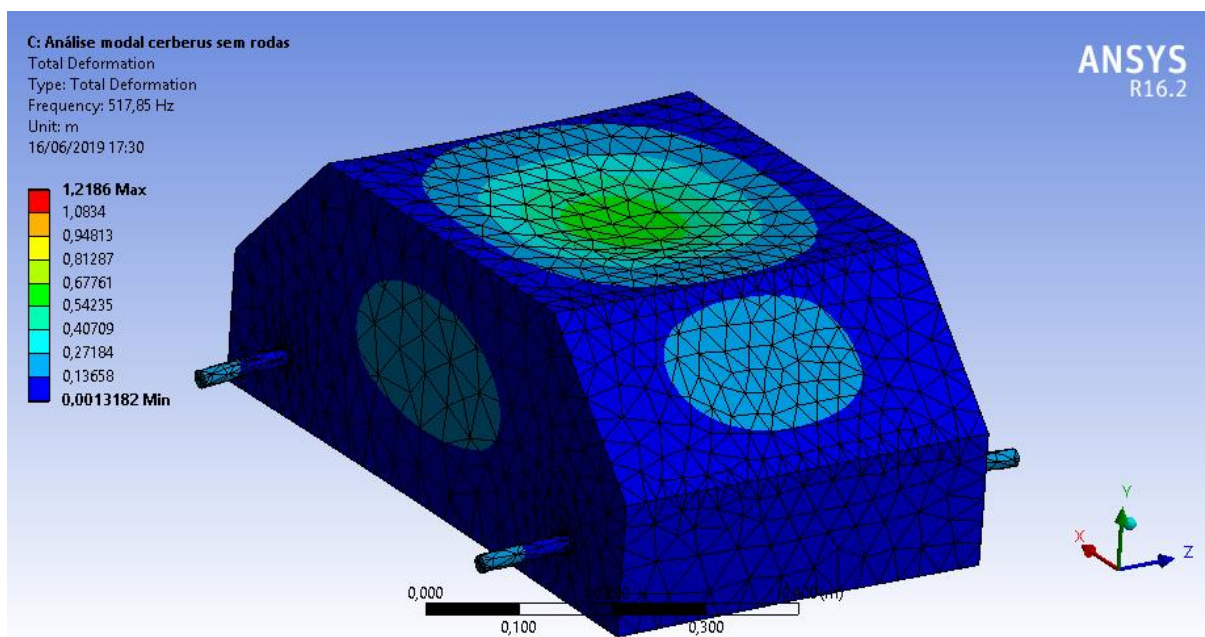


- 8) Gráfico de tensão equivalente de Von Mises para a mesma situação citada no item anterior.

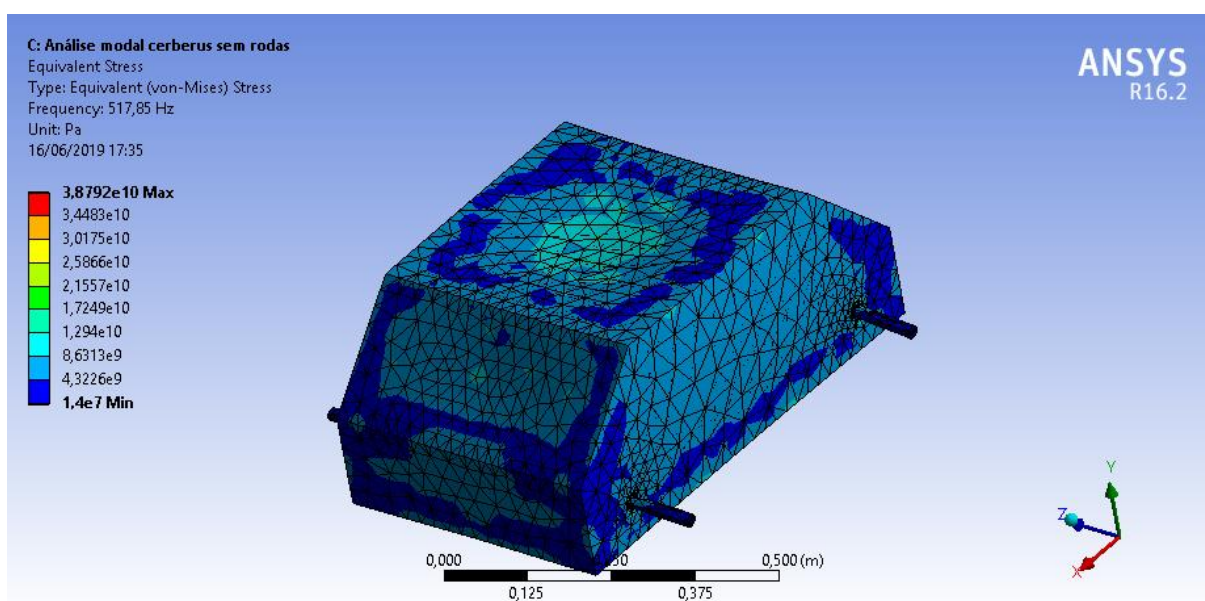


C. ANÁLISE MODAL DA ESTRUTURA FECHADA SEM AS RODAS

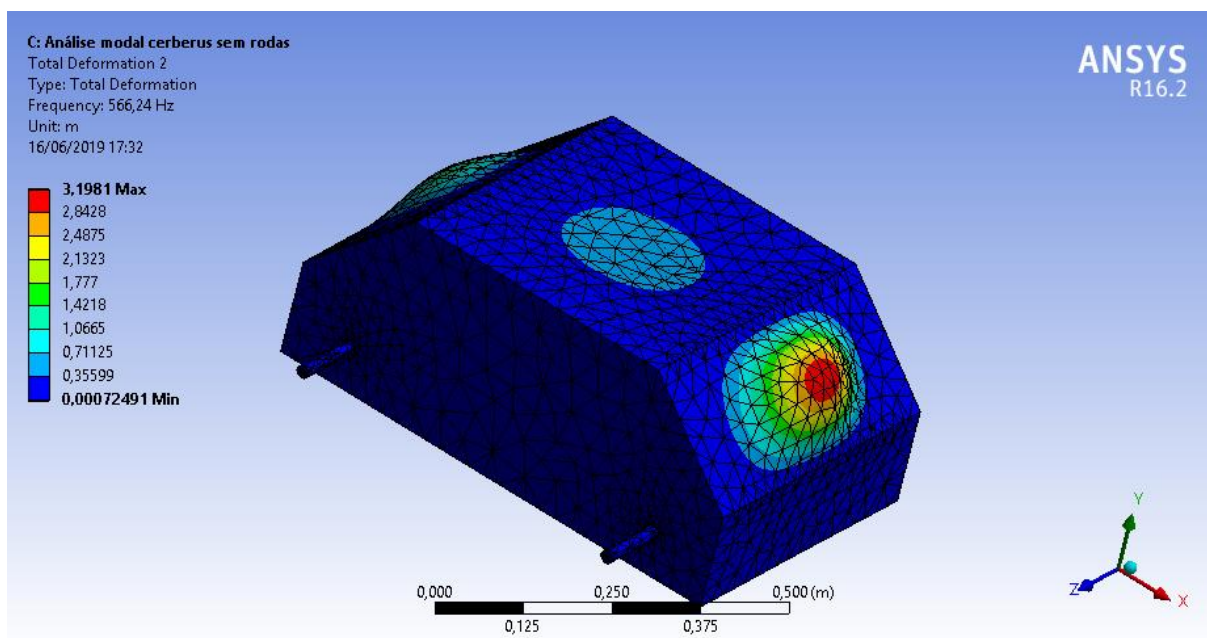
- 1) Gráfico de deformação total para estrutura fechada sem as rodas, em alumínio, submetida a vibrações livres, comportamento na frequência de 517,85 Hz.



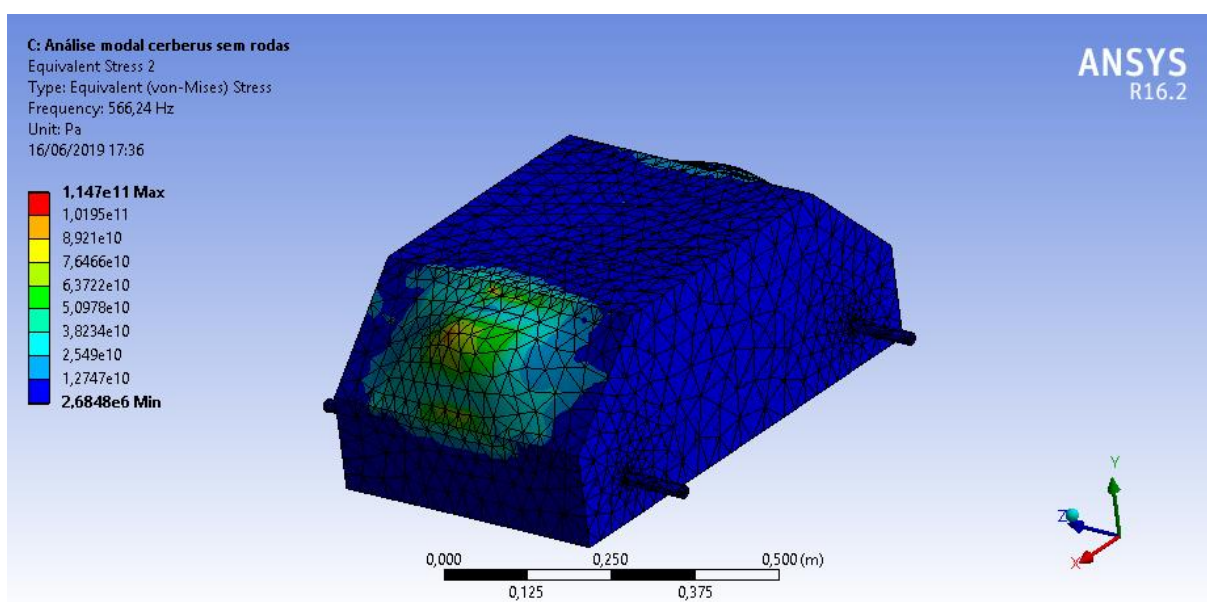
- 2) Gráfico de tensão equivalente de Von Misses para a mesma situação citada no item anterior.



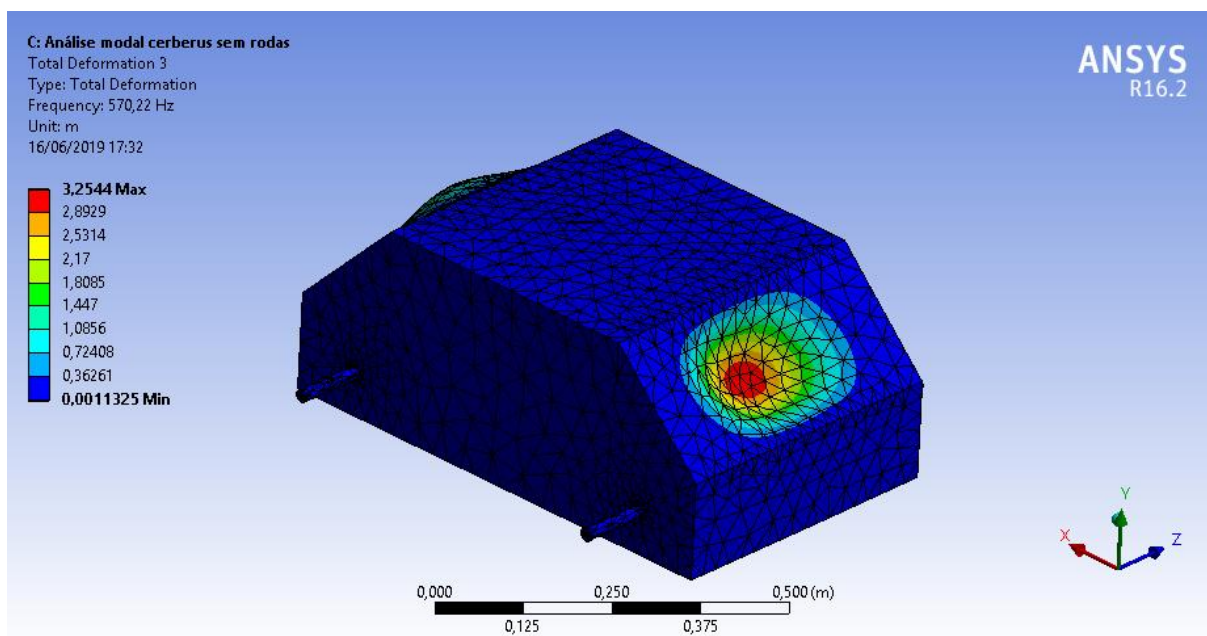
- 3) Gráfico de deformação total para estrutura fechada sem as rodas, em alumínio, submetida a vibrações livres, comportamento na frequência de 566,24 Hz.



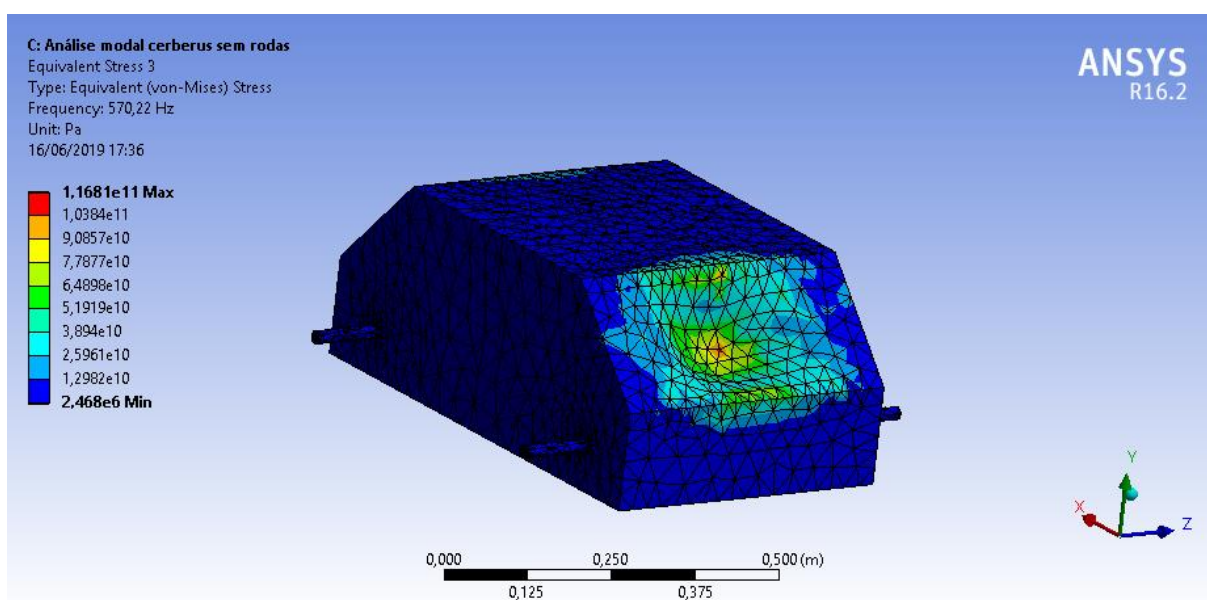
- 4) Gráfico de tensão equivalente de Von Mises para a mesma situação citada no item anterior.



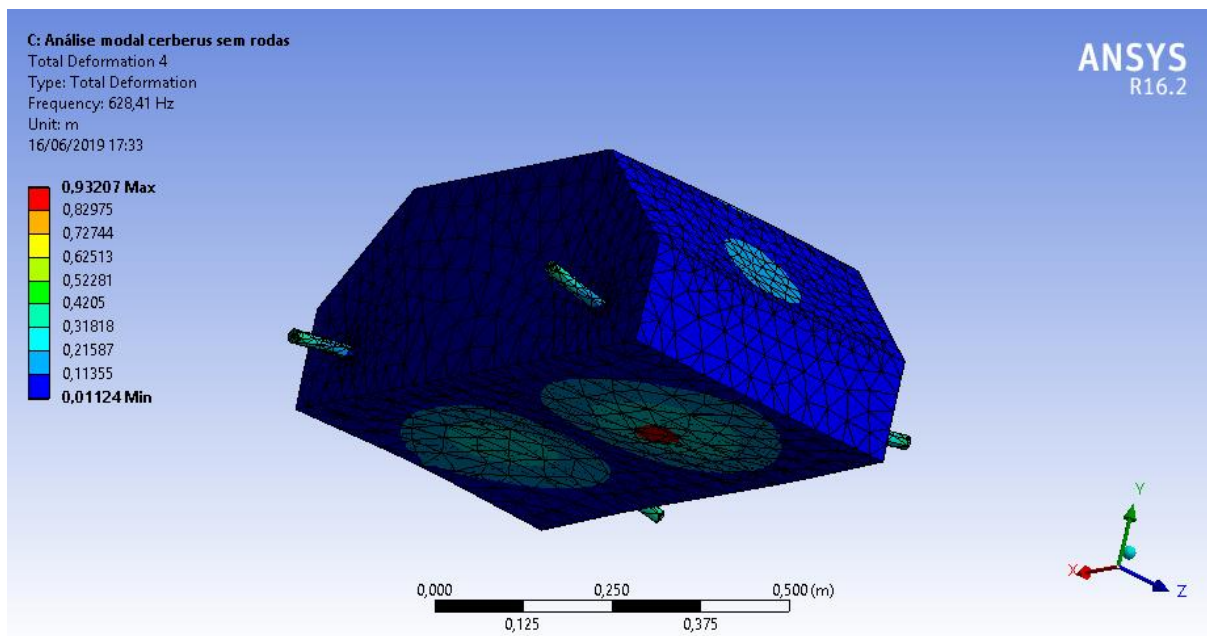
- 5) Gráfico de deformação total para estrutura fechada sem as rodas, em alumínio, submetida a vibrações livres, comportamento na frequência de 570,22 Hz.



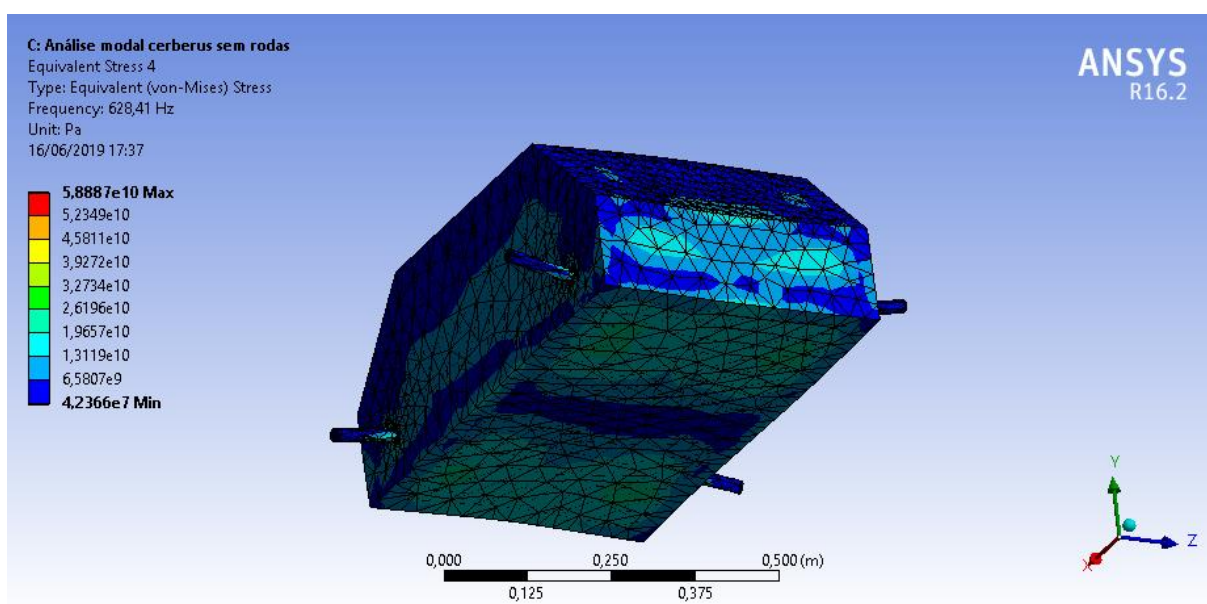
- 6) Gráfico de tensão equivalente de Von Mises para a mesma situação citada no item anterior.



- 7) Gráfico de deformação total para estrutura fechada sem as rodas, em alumínio, submetida a vibrações livres, comportamento na frequência de 628,41 Hz.

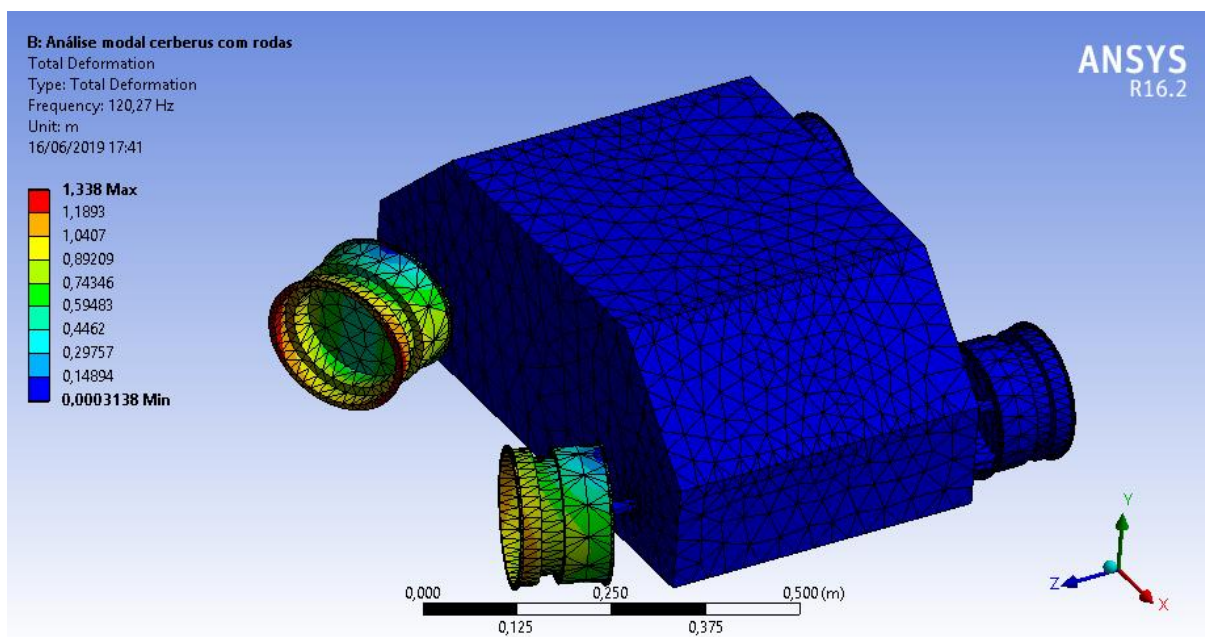


- 8) Gráfico de tensão equivalente de Von Misses para a mesma situação citada no item anterior.

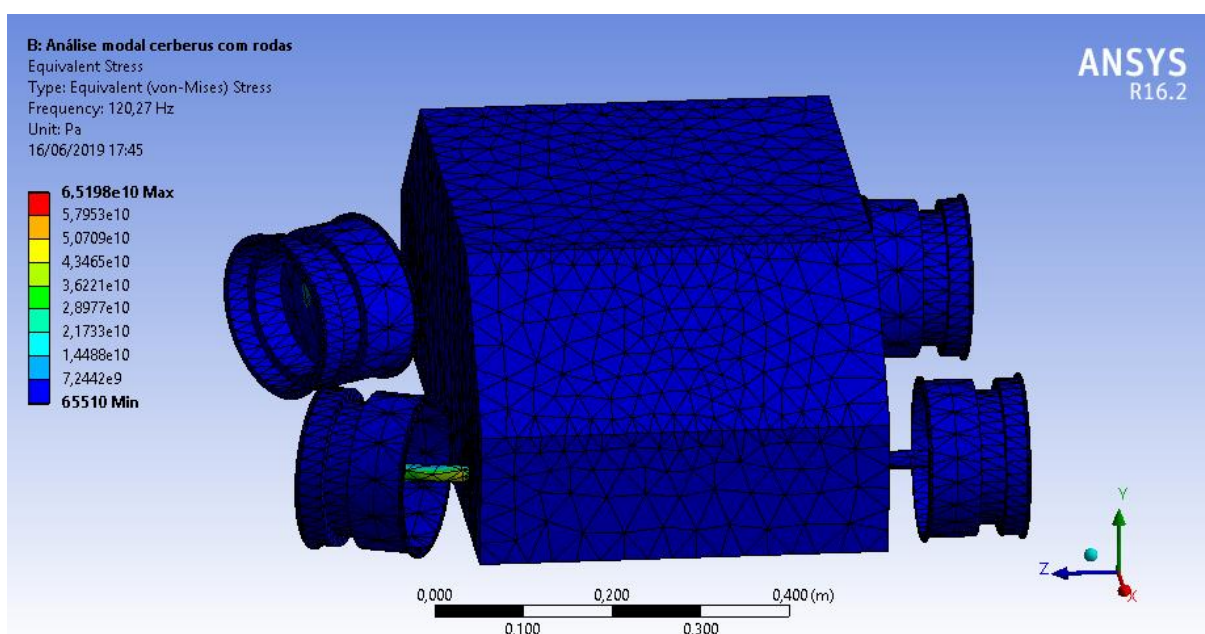


A. ANÁLISE MODAL DA ESTRUTURA FECHADA COM RODAS

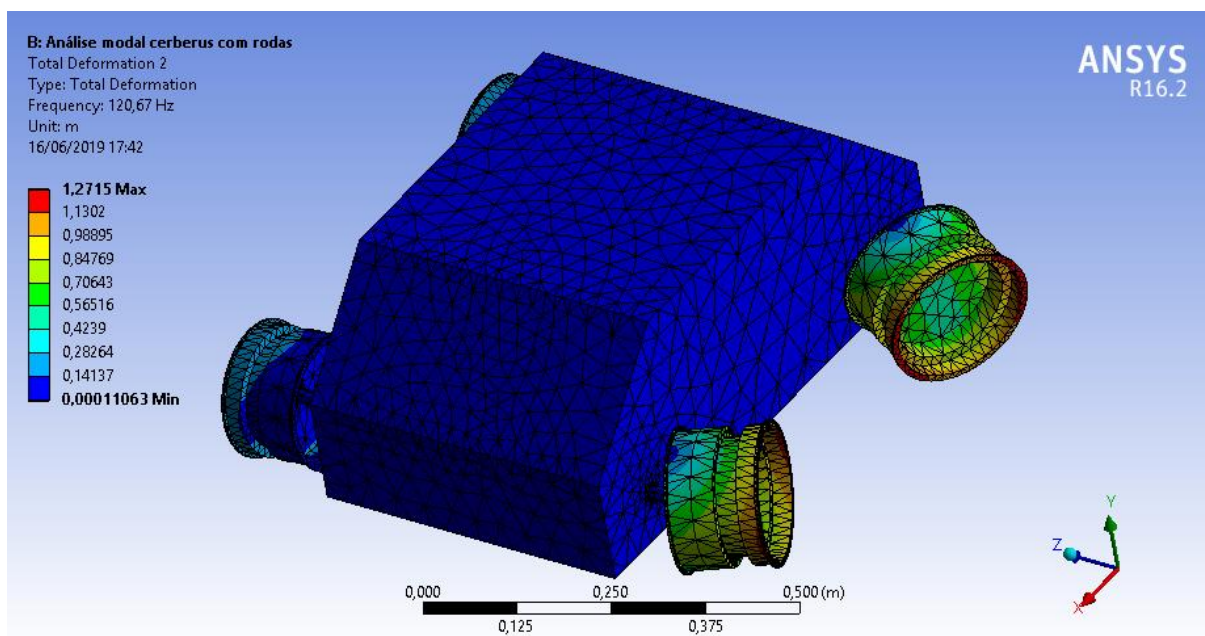
- 1) Gráfico de deformação total para estrutura fechada com rodas, em alumínio, submetida a vibrações livres, comportamento na frequência de 120,27 Hz.



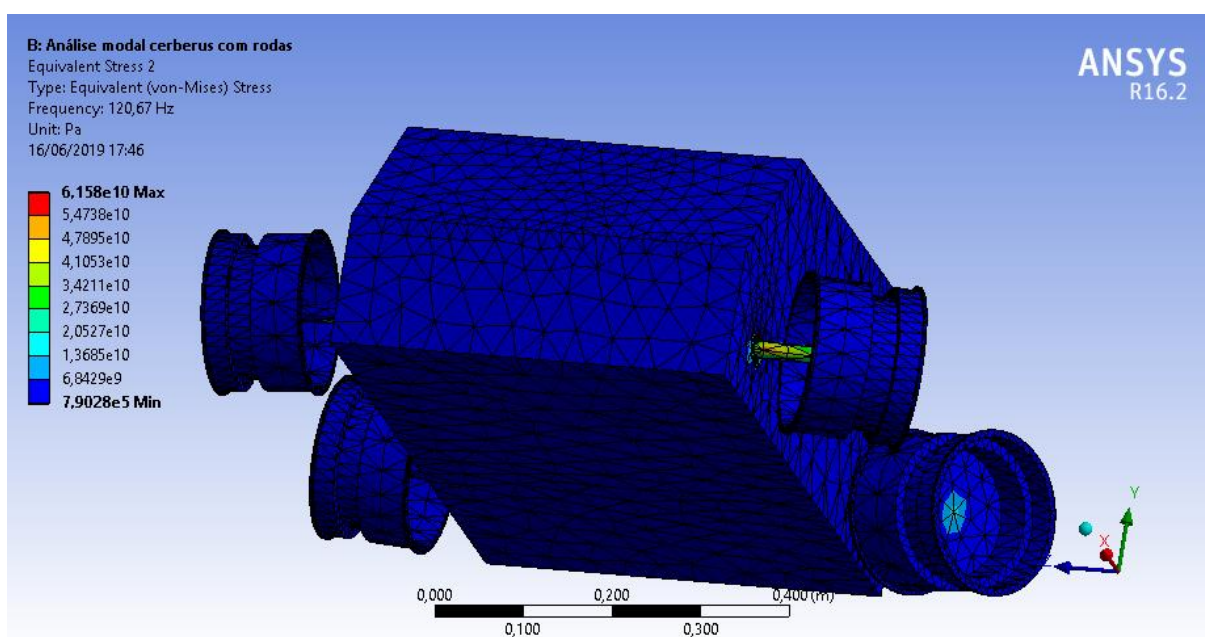
- 2) Gráfico de tensão equivalente de Von Misses para a mesma situação citada no item anterior.



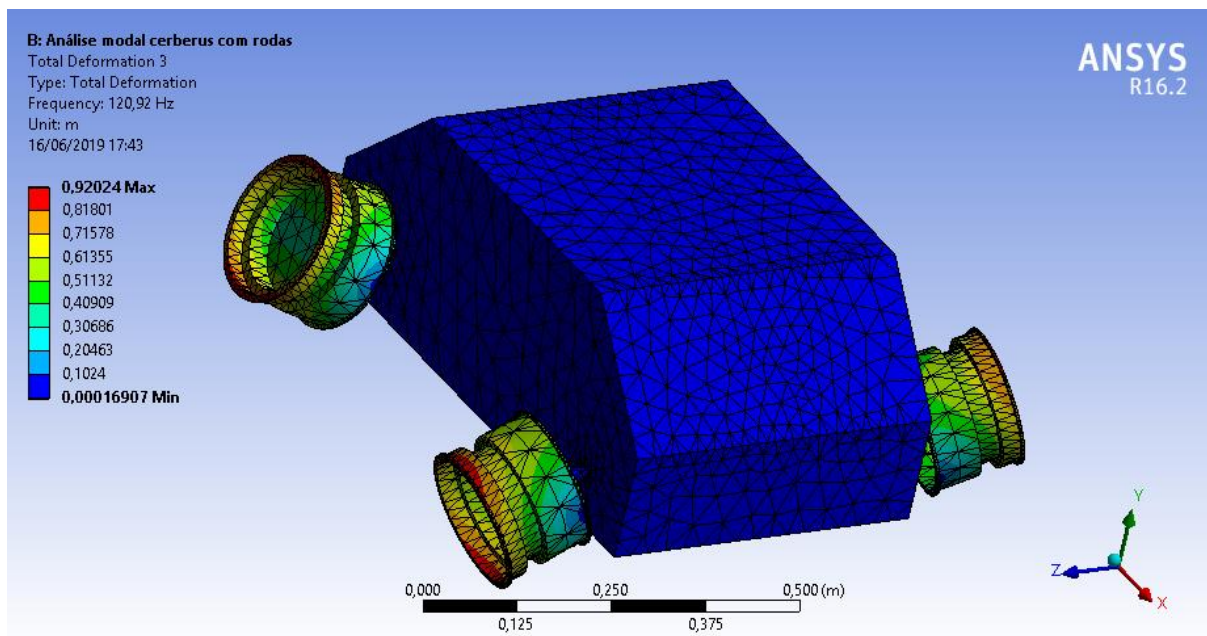
- 3) Gráfico de deformação total para estrutura fechada com rodas, em alumínio, submetida a vibrações livres, comportamento na frequência de 120,67 Hz.



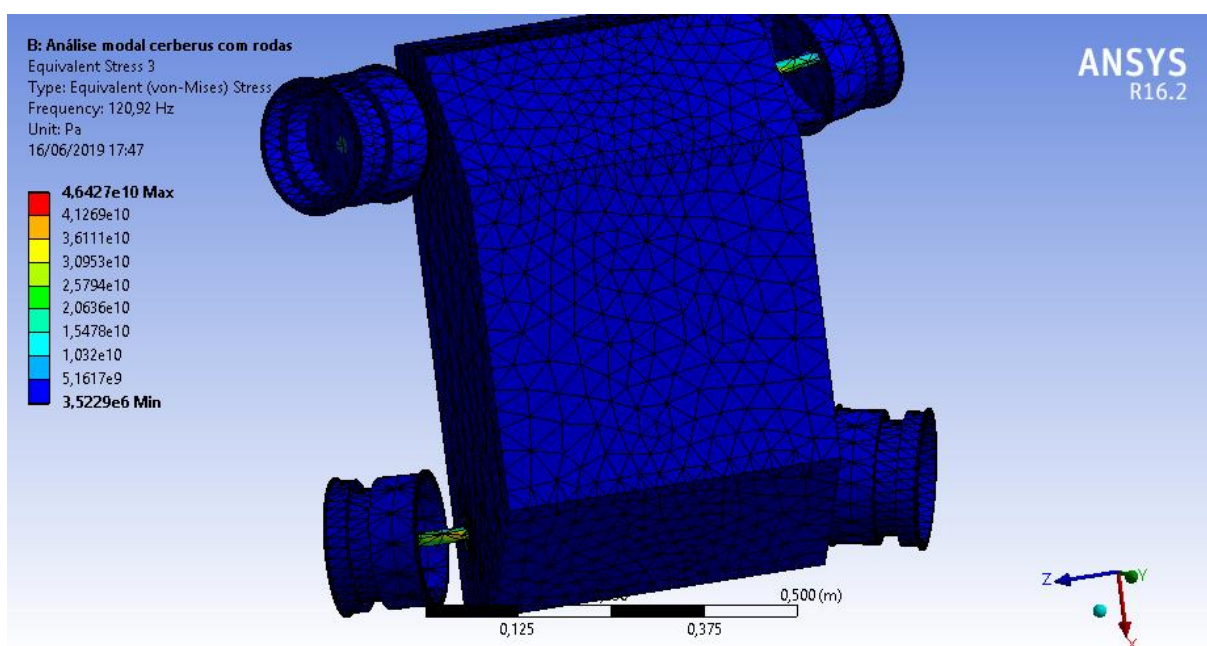
- 4) Gráfico de tensão equivalente de Von Misses para a mesma situação citada no item anterior.



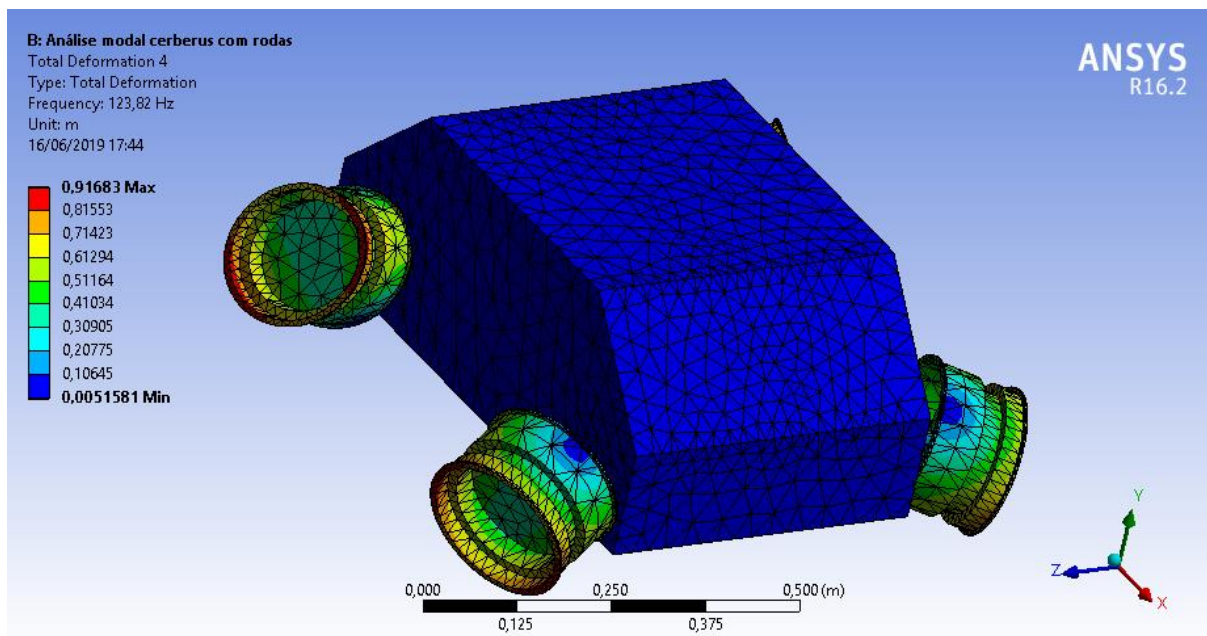
- 5) Gráfico de deformação total para estrutura fechada com rodas, em alumínio, submetida a vibrações livres, comportamento na frequência de 120,92 Hz.



- 6) Gráfico de tensão equivalente de Von Misses para a mesma situação citada no item anterior.



- 7) Gráfico de deformação total para estrutura fechada com rodas, em alumínio, submetida a vibrações livres, comportamento na frequência de 123,82 Hz.



- 8) Gráfico de tensão equivalente de Von Misses para a mesma situação citada no item anterior.

